

Relación de la acidificación en algunos Argiudoles y Hapludoles con la presencia de aluminio

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires
Área Ciencias del Suelo*

Marco Cueva Tacuri

Ingeniero Agropecuario – Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador) - 2014

Lugar de trabajo: Cátedra de Edafología – FAUBA



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Directora de Tesis

Olga Susana Heredia

Ingeniera Agrónoma - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires
Magister en Ciencias del Suelo - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires
Doctora de la Universidad de Buenos Aires – Área toxicología

Codirectora de Tesis

Ruth Paola Ríos

Ingeniera Agrónoma - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires
Magister en Ciencias del Suelo - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

Consejero de Estudios

Mariano Oyarzabal

Ingeniero Agrónomo - Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires
Doctor en Ciencias Agropecuarias – Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TESIS

Jurado

Dr. Esteban Ariel Ciarlo

Profesor de la Facultad de Agronomía
Universidad de Buenos Aires

Jurado

Dr. Fernando García

Profesor de la Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce
Universidad Nacional de Mar del Plata

Jurado

Dr. Nicolás Wyngaard

Profesor de la Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce
Universidad Nacional de Mar del Plata

MARZO 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia y de manera especial a mi amada abuela Blanca Lidia Palacios (†) por su amor y su apoyo incondicional, a mi hija Ariana y a todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones, concediéndome salud y entendimiento para culminar con éxito mis estudios.

A mi directora de tesis Olga Susana Heredia, por su dedicación y ayuda que hicieron posible la realización de este trabajo.

A Ruth Paola Ríos, por sus valiosos consejos y opiniones.

A Mariano Oyarzabal, por su importante aporte y participación en el desarrollo de esta tesis.

A Celio Chagas, por toda su ayuda y orientación en la parte inicial de mi posgrado.

A Eduardo Vella y a su hermosa familia por todo su apoyo y cariño.

A Andrea Herrera, por su valiosa ayuda en el manejo de equipos y técnicas de laboratorio realizadas en este trabajo.

A Catalina Raimondo, por toda su colaboración en el trabajo realizado.

A la Chacra Bragado – Chivilcoy de AAPRESID, a la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA), y a todos los productores que permitieron la obtención de las muestras de mi tesis.

Al proyecto UBACyT 20020170100396BA por el financiamiento de esta tesis.

A la Cátedra de Edafología, a todo el personal docente y no docente, que me ayudaron y me alentaron.

A mi familia y amigos, que siempre estuvieron a mi lado.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Ing. Marco Cueva Tacuri

Índice general.

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción general.	1
1.2. Objetivos.	10
1.2.1. Objetivo general.	10
1.2.2. Objetivos específicos.	10
1.3. Hipótesis.	10
1.3.1. Hipótesis general.	10
1.3.2. Hipótesis específicas	10
1.4. Organización de la Tesis.	11
2. CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	12
2.1. Localización de los sitios de muestreo.	12
2.1.1. Datos de precipitación en la Región Pampeana.	13
2.2. Muestreo de suelos.	14
2.3. Determinaciones de laboratorio.	14
2.3.1. Determinación del pH actual y potencial.	14
2.3.2. Materia orgánica del suelo (MOS).	15
2.3.3. Bases intercambiables.	15
2.3.5. Acidez intercambiable.	16
2.3.6. Aluminio intercambiable.	16
2.3.7. Textura del suelo.	17
2.4. Diseño del experimento.	17
2.5. Análisis estadístico.	18
3. CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
3.1. Medidas de estadística descriptiva y análisis de componentes principales (ACP) de los suelos estudiados.	20
3.1.1. Estadística descriptiva.	20
3.1.2. Análisis de componentes principales (ACP).	21
3.2. Resultados y discusión del objetivo específico 1: Análisis del contenido de aluminio y acidez intercambiable en los suelos agrícolas y verificar su potencial toxicidad para los cultivos.	22
3.2.1. Contenido de aluminio intercambiable (Al_i).	22
3.2.1.1. Niveles de toxicidad del Al_i .	24
3.2.2. Magnitud de la acidez i .	25
3.3. Resultados y discusión del objetivo específico 2: determinar si la agricultura continua produjo diferencias en el pH actual y potencial en los suelos estudiados de la Región Pampeana.	28

3.3.1.	Variación en el pH actual.	28
3.3.2.	Variación en el pH potencial.	31
3.4.	Resultados y discusión del objetivo específico 3: Definir qué variables edáficas explican el cambio de los valores del pH actual y potencial.	33
3.4.1.	Análisis del Δ pH actual con las variables edáficas.	34
3.4.2.	Análisis del Δ pH potencial con las variables edáficas.	34
3.5.	Resultados y discusión del objetivo específico 4: Evaluar la variación del pH actual y potencial en los suelos agrícolas y prístinos.	36
3.5.1.	Variación del pH actual.	36
3.5.1.1.	Regresión lineal entre el pH actual y Al_i	37
3.5.1.2.	Regresión lineal entre el pH actual y la Acidez i	38
3.5.1.3.	Regresión lineal entre el pH actual y la suma de bases i	38
3.5.1.4.	Regresión lineal entre pH actual y CICE.	40
3.5.1.5.	Regresión lineal entre pH actual y MOS.	40
3.5.1.6.	Regresión lineal entre el pH actual y la precipitación.	41
3.5.1.7.	Análisis de regresión múltiple (pH actual).	41
3.5.2.	Variación del pH potencial.	42
3.5.2.1.	Regresión lineal entre el pH potencial y las variables edáficas.	42
3.5.2.2.	Análisis de regresión múltiple (pH potencial).	43
3.6.	Resultados y discusión del objetivo específico 5: Comparar si existen diferencias de comportamiento en la variación del pH actual y potencial entre los suelos Argiudoles y Hapludoles.	44
3.6.1.	Estadística descriptiva.	44
3.6.2.	Variación del pH actual en los Grandes Grupos.	46
3.6.2.1.	Regresión lineal entre el Al_i y el pH actual.	46
3.6.2.2.	Regresión lineal entre Acidez i y el pH actual.	47
3.6.2.3.	Regresión lineal entre la suma bases y el pH actual.	49
3.6.2.4.	Regresión lineal entre la CICE y el pH actual.	50
3.6.2.5.	Regresión lineal entre la MOS y el pH actual.	50
3.6.3.	Variación del pH potencial en los Grandes Grupos.	51
3.6.3.1.	Regresión lineal entre la Acidez i y el pH potencial.	52
3.6.3.2.	Regresión lineal entre pH potencial y las variables edáficas.	53
4.	CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	54
4.1.	Conclusiones para el objetivo específico 1.	54
4.2.	Conclusiones para el objetivo específico 2.	54
4.3.	Conclusiones para el objetivo específico 3.	55
4.4.	Conclusiones para el objetivo específico 4.	55

4.5. Conclusiones para el objetivo específico 5.	56
4.6. Conclusiones generales.	57
4.6. Consideraciones finales.....	58
5. BIBLIOGRAFÍA.....	59
6. ANEXOS.....	70
6.1. Anexo 1: Coordenadas y análisis granulométrico de los sitios estudiados.....	70
6.2. Anexo 2: Matriz de los coeficientes de correlación de las variables estudiadas.	72
6.3. Anexo 3: Autovectores del análisis de componentes principales.....	73

Índice de figuras

Figura 1.1. Comportamiento del Aluminio en el suelo en función del pH a) forma intercambiable, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$; (b) productos de la hidrólisis de polímero con liberación de H^+ ; (c) fase sólida, gibsitita; y (d) formas aniónicas (extraída de Porta et al., 1994).	6
Figura 2.1. Ubicación de los sitios de muestreo sobre el mapa de las unidades de vegetación de la Argentina. Adaptado de Oyarzabal et al. (2018).	13
Figura 3.1. Análisis de componentes principales entre las propiedades químicas y físicas de todos los suelos estudiados.	21
Figura 3.2. Valores de Ali (0-20 cm) en los suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana. La línea horizontal entrecortada indica el valor del Ali . de los suelos prístinos.	23
Figura 3.3. Valores de Acidez i (0-20 cm) en los suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana. La línea horizontal entrecortada indica el valor de la media de Acidez i de los suelos prístinos.	26
Figura 3.4. Relación entre las bases intercambiables ($\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{Na}$) y la acidez i (0-20 cm) en suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana.	27
Figura 3.5. Valores de pH actual (0-20 cm) en suelos de los 16 grupos estudiados de la Región Pampeana. Las barras indican el error estándar respecto a la media. A=Argiudoles; H=Hapludoles.	28
Figura 3.6. Valores de pH actual (0-20 cm) en suelos de los 16 grupos estudiados de la Región Pampeana. Las barras indican el error estándar respecto a la media. A=Argiudoles; H=Hapludoles.	32
Figura 3.7. Relación lineal entre el Δ Acidez i y el Δ pH potencial (0-20 cm) en los suelos estudiados de la Región Pampeana.	35
Figura 3.8. Relación lineal entre el Δ Acidez i y el Δ pH potencial (0-20 cm) en los Grandes Grupos de suelos estudiados de la Región Pampeana.	36
Figura 3.9. Relación entre pH actual y acidez intercambiable (0-20 cm) en suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana.	38
Figura 3.10. Relación entre la suma de bases intercambiables y el pH actual (0-20 cm) en suelos de la Región Pampeana.	39
Figura 3.11. Relación entre el Ali y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.	46
Figura 3.12. Relación entre la Acidez i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.	48
Figura 3.13. Relación entre la suma de bases i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.	49
Figura 3.14. Relación entre la MOS y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.	51
Figura 3.15. Relación entre la Acidez i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.	52

Índice de Tablas.

Tabla 1. Grupos y factores de estudio en suelos de la Región Pampeana.	18
Tabla 2. Resumen de las medidas descriptivas de los suelos estudiados de la Región Pampeana. Min: Mínimo; Max: Máximo; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación (%).	20
Tabla 3. Umbrales de toxicidad de Ali en los suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana. Mín.=mínimo; Máx.= máximo.	24
Tabla 4. Análisis de t apareada del Δ pH actual (1: 2,5) en los suelos estudiados de la Región Pampeana. DE= desviación estándar; LS= límite superior.	29
Tabla 5. Análisis de t apareada del Δ pH potencial (1: 2,5) en los suelos estudiados de la Región Pampeana. pH P= pH potencial; pH A= pH actual; DE= desviación estándar; LS= límite superior.	32
Tabla 6. Valores delta Δ de las variables estudiadas en los grupos de suelos la Región Pampeana. pH p= pH potencial.	33
Tabla 7. Análisis de t apareada de los valores delta Δ de Ali y Acidez i en los suelos estudiados de la Región Pampeana.; DE= desviación estándar; LI= límite inferior.	34
Tabla 8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados. LI= límite inferior; LS= límite superior; VIF= factor de inflación de la varianza.	41
Tabla 9. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el pH actual. R ² = coeficiente de determinación; EE= error experimental.	43
Tabla 10. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el pH potencial. LI= límite inferior; LS= límite superior; VIF= factor de inflación de la varianza.	43
Tabla 11. Resumen de las medidas descriptivas de los suelos estudiados de la Región Pampeana. Min: Mínimo; Max: Máximo; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación (%).	45
Tabla 12. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el pH potencial. R ² = coeficiente de determinación.	53
Tabla 13. Coordenadas y análisis granulométrico de los sitios estudiados.	70
Tabla 14. Matriz de los coeficientes de correlación de las variables estudiadas. .	72
Tabla 15. Matriz de correlación / probabilidades de las variables estudiadas.	72
Tabla 16. Autovectores y análisis de correlación de las variables estudiadas.	73

ABREVIATURAS

Al_i: aluminio intercambiable
Acidez _i: acidez intercambiable
Bases _i: bases intercambiables
CIC: capacidad de intercambio catiónico
CO: carbono orgánico
COT: carbono orgánico total
CP1: eje componente principal 1
CP2: eje componente principal 2
ACP: análisis de componentes principales
cmol_c: centimol carga
meq: miliequivalente
CICE: capacidad de intercambio catiónica efectiva
MOS: materia orgánica del suelo
A: Argiudol
H: Hapludol

RESUMEN

Relación de la acidificación en algunos Argiudoles y Hapludoles con la presencia de aluminio

En los últimos años las regiones templadas argentinas y fundamentalmente la Región Pampeana, han manifestado un problema edáfico emergente: se trata de la acidificación de suelos a causa de la producción agropecuaria prolongada. El objetivo de este trabajo fue establecer la relación entre la acidificación y la presencia de aluminio en suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos con 25 años de uso agrícola continuo. Se tomaron 78 muestras superficiales de suelos pampeanos que se agruparon en 16 grupos, 8 grupos de suelos Hapludoles y 8 de suelos Argiudoles. Se analizó: pH actual, pH potencial, acidez y aluminio intercambiable, bases intercambiables, MOS (Materia Orgánica del Suelo), CICE (Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva) y textura. Los análisis estadísticos fueron ACP (Análisis de Componentes Principales), ANAVA (Análisis de Varianza), análisis de t apareada, regresión lineal y análisis de correlación de Pearson. Los suelos bajo agricultura continua disminuyeron sus valores de pH y de bases intercambiables e incrementaron sus niveles de aluminio y acidez intercambiable respecto a los prístinos. Se encontró que la relación entre el pH y MOS fue diferente entre los grandes grupos de suelo, siendo esta la única relación que presentó diferencias significativas entre Argiudoles y Hapludoles. La variación de los valores de pH fue explicada en un 74% por la acidez y las bases intercambiables, mientras que la variación de la acidez intercambiable fue explicada en un 57% por la suma de bases intercambiables. Los valores actuales de aluminio intercambiable en los suelos no representan riesgo de toxicidad para los cultivos agrícolas de la región.

Palabras clave: Bases intercambiables, uso de la tierra, pH, toxicidad

ABSTRACT

Relationship between acidification and aluminum presence in some Argiudolls and Hapludolls

In recent years in the temperate regions of Argentina and mainly the Pampas Region have manifested an emerging edaphic problem: it is the acidification of soils due to prolonged agricultural production. The aim of this study was to establish the relationship between acidification and the presence of aluminum in Argiudolls and Hapludolls Pampas soils with 25 years of continuous agricultural use. Were taken 78 surface samples from Pampas soils that were grouped into 16 groups. These groups were divided into: 8 groups of Hapludolls and 8 of Argiudoles soils. We analyzed: current pH, potential pH, acidity and exchangeable aluminum, exchangeable bases, SOM (Soil Organic Matter), ECEC (Effective Cation Exchange Capacity) and texture. The statistical analyzes developed were PCA (Principal Component Analysis), ANOVA (Analysis of Variance), paired t analysis, linear regression and Pearson correlation analysis. The soils under continuous agriculture decreased their pH and exchangeable base values and increased their levels of aluminum and exchangeable acidity compared to pristine soils. It was found that the relationship between pH and SOM was different between large soil groups, this being the only relationship that presented significant differences between Argiudoles and Hapludoles. The variation of the pH values was explained in 74% by acidity and exchangeable bases, while the variation in exchangeable acidity was explained in 57% by the sum of exchangeable bases. Current exchangeable aluminum values in soils do not represent a toxicity risk for agricultural crops in the region.

Key words: Exchangeable bases, land use, pH, toxicity

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general.

Aproximadamente el 30% de los suelos agrícolas del mundo están afectados por problemas de acidez y muchos de ellos se encuentran en las regiones más productivas (Havlin et al., 2005). En los últimos 50 años, dos tercios de los suelos agrícolas del mundo fueron afectados por algún tipo de degradación; 305 millones de hectáreas han perdido completamente su capacidad productiva y ambiental, que representan el 21% de las tierras agrícolas. En Argentina más de la mitad del territorio se encuentra afectado por algún tipo de degradación (Morales y Parada, 2005; Pla Sentis, 2006).

La acidez edáfica es considerada como una de las principales limitantes para la producción agropecuaria a nivel mundial, afectando en forma directa al crecimiento de las plantas como resultado de la restricción del desarrollo radicular (Barceló y Poschenrieder, 2002) y en forma indirecta incidiendo negativamente en la disponibilidad de nutrientes, que es una de las mayores limitaciones de la baja productividad en los suelos ácidos (Rahman et al., 2018); así también, en el incremento de elementos fitotóxicos, en la actividad microbiana y hasta en las condiciones físicas de los suelos (Rout y Samantara, 2001; Zapata, 2004).

El proceso de acidificación del suelo es un problema potencialmente grave de degradación. Sin tratamiento, la acidificación tiene un gran impacto en la productividad agrícola y en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El aumento de los rendimientos de los cultivos origina mayor extracción de bases del suelo. El grano tiene menor contenido de bases que las hojas o los tallos; por esta razón, la acidez del suelo se desarrollará más rápido en forrajes de alto rendimiento como la alfalfa (Larssen y Carmichael, 2000; Johnson y Zhang, 2002). Este proceso no es generalizado, sino que

se localiza principalmente en suelos donde ocurre una elevada extracción de calcio y magnesio (Fernández et al., 2003; Vázquez et al., 2012).

El indicador de la acidez del suelo universalmente aceptado es el pH en agua o pH actual, el cual es una medida de la concentración de protones e indica el estado de acidez o alcalinidad del suelo (McCarty et al., 2003). La actividad de los nutrientes y el crecimiento de las plantas queda condicionada por esta variable. Pueden medirse distintas formas de acidez; la activa, la potencial, la intercambiable y la total (Tan, 1998; Espinosa y Molina, 1999). La acidez total es importante porque suelos con valores de pH similares pueden tener cantidades muy diferentes de acidez total que requerirán cantidades diferentes de cal agrícola en caso de intentar corregir sus valores de acidez (Bloom et al., 2005).

La intensificación agrícola junto con el empleo de germoplasmas de alto potencial de rendimiento y el uso de fertilizantes nitrogenados han sido factores determinantes de la problemática a nivel regional (Fabrizzi et al., 1998; Divito et al., 2011; Vázquez y Pagani, 2014; Iturri, 2015). La aplicación frecuente de ciertos fertilizantes nitrogenados, resultan en la liberación de protones (H^+) que durante el proceso de nitrificación, los cuales pueden pasar al complejo de cambio y acidifican el suelo (Chien et al., 2001) y en casos extremos producir la degradación de las arcillas y con ello la disminución de la capacidad de intercambio catiónico de los suelos (Barak et al., 1997; Blake et al., 1999; Mc Gahan et al., 2003; Macías et al., 2005; Iturri, 2015). Los fertilizantes a base de amoníaco o los que producen amoníaco en el suelo, generan acidificación porque generalmente liberan más protones que la cantidad consumida durante las diferentes transformaciones que tienen lugar en el suelo (Bolan et al., 2003). El uso de fertilizantes fosfatados y nitrogenados se incrementó en Argentina desde mediados de los 90 (Lavado, 2006) y su consumo se ubica alrededor de 120 kg ha^{-1} (Melgar, 2005).

La precipitación influye en la acidez del suelo debido a la lixiviación y erosión de iones de reacción básica del perfil como calcio, magnesio, potasio y sodio, dejando los elementos de reacción ácida como hidrógeno, aluminio y manganeso (Mark et al., 2005). Por lo tanto, un suelo ácido tiene bajos niveles de bases intercambiables (Darusman et al., 1991; Fernández et al., 2003; Tavakkoli et al., 2015) y altas concentraciones de sustancias que podrían llegar a hacer fitotóxicas, principalmente compuestos activos de aluminio (Drábek et al., 2005; Brautigan, 2012). Las interacciones entre cationes y aniones controlan el pH del suelo (Rengasamy, 2010).

Existen evidencias de disminución del pH en los suelos agrícolas de la Región Pampeana, Urricariet y Lavado (1999) detectaron descensos significativos del pH edáfico en 0,6 unidades en el Norte de la Pampa Ondulada; Heredia et al. (1997) analizaron el efecto del encalado en la serie Río Tala acidificada por uso agrícola, encontrando valores de pH 5,7; Melgar et al. (2003) indicaron que el 10% de los lotes agrícolas analizados presentaron problemas de acidez con pH menor a 5,8. Carrizo (2007) encontró que 10 de los 32 lotes agrícolas estudiados en el centro de la provincia de Santa Fe, presentaron un pH inferior a 5,4 en los primeros 30 cm de profundidad.

Pilatti et al. (2008) estudiaron la química de algunos Argiudoles agrícolas en la Región Pampeana y mostraron que en el 84% de los sitios muestreados, los valores de pH estaban entre 5,6 y 6,2. Álvarez et al. (2009) encontraron que el promedio de pH en condiciones cuasi prístinas fue de 6,01 y en condiciones agrícolas de (5,84 - 5,81) bajo labranza convencional y siembra directa respectivamente. En síntesis, el efecto del manejo agrícola sobre el pH responde a procesos de exportación de bases sin reposición con las cosechas (Vázquez, 2005, Videla et al., 2012), a la erosión hídrica y al lavado de las bases en profundidad (Michelena et al., 1988), al empleo de fertilizantes

nitrogenados y a la implementación de labranzas reducidas o siembra directa (Wyngaard et al., 2012).

Más del 15% de la corteza terrestre está compuesta por Al_2O_3 , el Al es altamente reactivo y constituye el elemento metálico más abundante de la corteza terrestre. Este elemento es poco soluble en suelos neutros o alcalinos (Casierra y Aguilar, 2007); sin embargo, con la reducción del pH del suelo se incrementa la solubilidad del Al hasta llegar a ocupar más de la mitad de los sitios de intercambio iónico del suelo, derivando en deficiencias nutricionales relacionadas a las bases como calcio, magnesio y potasio. Es por lo que el proceso de acidificación está íntimamente ligado a los iones mencionados y particularmente a la dinámica del Al^{3+} en la solución del suelo (Zapata, 2004).

El pH en el cual los niveles de Al alcanzan valores perjudiciales depende de una serie de factores del suelo como la mineralogía de arcillas, el contenido de materia orgánica, la presencia de otros cationes en el complejo de cambio y en la solución del suelo. La producción de la mayoría de los cultivos se reduce fuertemente cuando la saturación con Al^{3+} en el complejo de cambio es superior al 60% (Kamprath, 1984; Fassbender, 1987). Casierra y Aguilar (2007) manifiestan que esto ocurre cuando la saturación de aluminio en relación con los cationes intercambiables es mayor al 25%.

Los efectos perjudiciales de la acidez edáfica en el crecimiento de las plantas dependen de las actividades de los iones H^+ y Al^{3+} en la solución del suelo (Pavan, 1983; Thomas y Hargrove, 1984). Existen cultivos sensibles a la acidez como la alfalfa, la canola y la cebada, que son difíciles de establecer y cultivar en suelos ácidos (Yokota y Ojima, 1995). En condiciones ligeramente ácidas a neutras, el Al se encuentra unido a los silicatos y a los óxidos minerales; Sin embargo, en condiciones fuertemente ácidas se libera a partir de formas insolubles incrementado su disponibilidad en el suelo y la

posibilidad de causar toxicidad a las plantas (Bulanova et al., 2004). La liberación de especies tóxicas de Al es un problema serio, razón por la cual ha sido objeto de estudio durante las últimas décadas (Panda et al., 2003).

La acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) es una medida de la cantidad de iones acidificantes presentes en los sitios de intercambio del suelo (Espinosa y Molina, 1999; Iturri, 2015). La solubilidad y formas químicas del Al^{+3} en agua pura está determinada por una secuencia de etapas de hidrólisis que finaliza en la precipitación del $\text{Al}(\text{OH})_3$ a pH 5,5 y una solubilización posterior de dicho precipitado como anión aluminato a pH mayor a 8. La solubilidad del Al por debajo de pH 4,5 es muy alta, y muy alta su toxicidad (Porta et al., 2003; Zapata, 2004). Cuando la acidez intercambiable es alta, afecta a muchos procesos en el suelo; en una condición ácida, el Al puede aumentar la sorción de fósforo (Frossard et al., 2000; Nair et al., 2004) causando deficiencia en las plantas (Thomson et al., 1993) y la solubilidad del Fe, el Al o el Mn puede ser muy alta pudiendo alcanzar niveles tóxicos a valores de pH menores de 5,6 (Liu et al., 2014).

Bohn (1993) destaca los trabajos de Jenny (1961), Coleman (1964) y otros, iniciados en la década del 50 quienes demuestran que las propiedades de ácidos débiles atribuidas a las arcillas hidrogenadas eran en realidad el resultado de una saturación parcial o completa de los sitios de intercambio con iones Al débilmente ácidos y que estos son los que liberan H^+ , incidiendo en el pH del suelo. Porta et al. (1994) mencionan que los suelos minerales ácidos no son simplemente suelos- H_3O^+ , sino esencialmente suelos- Al^{+3} y son las especies del Al las que liberan más o menos H^+ dependiendo de las condiciones del medio.

El comportamiento químico de los suelos ácidos se encuentra íntimamente ligado con las propiedades del Al en solución y el intercambiable, siendo la medición del pH, una medida que permite un diagnóstico rápido de los efectos potencialmente

perjudiciales de la acidez al medio en la relación suelo-planta, aunque no describa las causas ni el origen de la reacción que condujo a la presencia de H^+ en solución (Wild, 1992; Bohn, 1993).

El Al sólo actúa con un único estado de valencia (+3), el cambio de las cargas de los hidróxidos cambia con el pH del suelo (Figura 1.1.). Esto lo diferencia del Fe y del Mn, con dos estados de valencia, por lo cual las especies químicas que forman no sólo dependen del pH, sino también del potencial redox (Porta, et al., 1994).

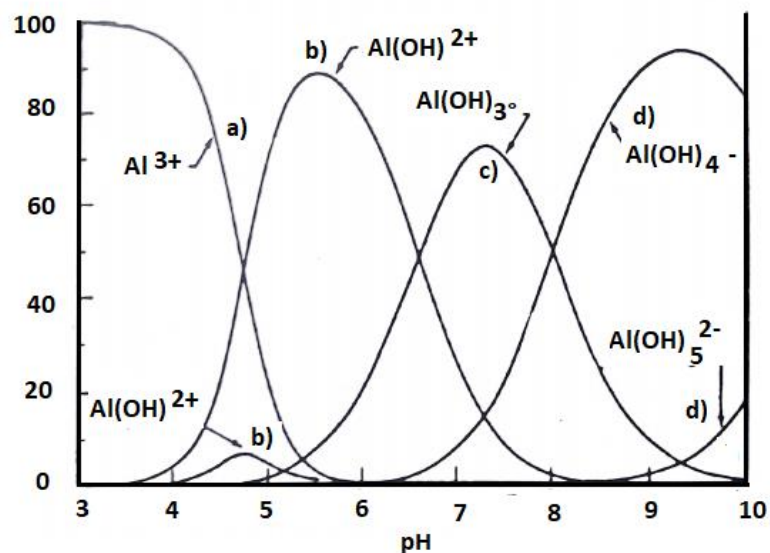
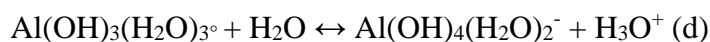
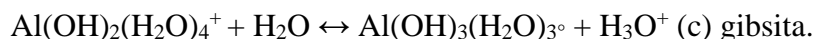
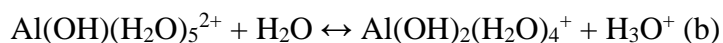
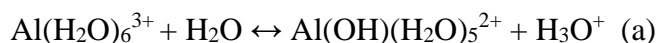


Figura 1.1. Comportamiento del Aluminio en el suelo en función del pH (a) forma intercambiable; (b) productos de la hidrólisis de polímero con liberación de H^+ ; (c) fase sólida, gibsitita; y (d) formas aniónicas (extraído de Porta et al., 1994).

En la Figura 1.1 se muestra el rango de pH en que ocurre la hidrólisis de cada especie de Al^{3+} y las formas químicas que resultan indicadas en la figura de manera esquemática, dependiendo del pH. Estas representan (a) forma intercambiable, $Al(H_2O)_6^{3+}$; (b) productos de la hidrólisis de polímero con liberación de H^+ ; (c) fase sólida, gibsitita (domina a partir de pH 7); y (d) formas aniónicas (Porta et al., 1994; Adams, 1995). Estas formas se sintetizan en las reacciones que se indican a continuación:



Si una base es agregada al suelo, los H^+ del medio serán neutralizados. Cuanta más base se agrega, más Al^{+3} se hidroliza con producción de H^+ en cantidad equivalente al Al^{+3} presente, base agregada, y pH del medio. Cada OH^- producido en la hidrólisis, se une a una carga positiva del Al^{+3} , así, las cargas positivas se van neutralizando con los OH^- y es el H^+ libre (como H_3O^+) el que se opone al aumento del pH. Al desplazarse hacia la derecha la reacción, hay un consumo de H_3O^+ ya que se incrementan los OH^- (Porta et al., 1994; Adams, 1995).

Se han generalizado tres criterios para considerar al aluminio como un problema en el suelo y/o ser tóxico para las plantas: (1) cuando se presentan en el suelo valores superiores a $2 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ de Al^{3+} ; (2) cuando el porcentaje de saturación de Al en relación con los cationes intercambiables es mayor que 25%; y (3) si la relación $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ es menor o igual que 1 (uno). En cualquiera de estos casos es necesaria la implementación de algún correctivo con el fin de reducir el efecto tóxico del Al para las plantas (Casierra y Aguilar, 2007).

Varias investigaciones indican los niveles de tolerancia de algunas especies vegetales a diferentes concentraciones de Al^{3+} . Yu et al. (2011) observaron una reducción significativa en la biomasa de la raíz en dos genotipos de soja (*Glycine max*) a 90 mg.L^{-1} de Al^{3+} . Roy y Bhadra (2014) encontraron una reducción en el crecimiento de las raíces y la productividad del arroz (*Oryza sativa*) a partir de 30 mg.L^{-1} de Al^{3+} .

Generalmente, el Al intercambiable se considera un factor importante en la acidez de los suelos altamente meteorizados, pero no suele tratarse como un factor contribuyente de la acidez en las regiones templadas, aunque debería serlo (Van Raij,

1991). De acuerdo con lo anterior, el estudio del Al intercambiable en los suelos de la Región Pampeana debería ser más extenso, esto debido a que en la región se practica una agricultura intensiva y donde en las últimas décadas se han incrementado las precipitaciones (Sierra et al., 1994). El clima es un factor que incide en los valores de pH, condiciones climáticas más húmedas producen menores valores de pH (Iturri, 2015).

Existe evidencia contradictoria referida al impacto de la agricultura sobre la acidez de los suelos de la región. Algunos reportes indican aumentos superficiales del pH cuando se cultivan los suelos (Buschiazzo et al., 2000; Wingeyer et al., 2015) y otros autores disminuciones (Maddonni et al., 1999; Sainz Rozas et al., 2011). Con respecto al aluminio intercambiable, Millán et al. (2010) mostraron incrementos de aluminio soluble e intercambiable en 10 suelos Argiudoles y Hapludoles de la Región Pampeana que fueron seleccionados por su acidez, aunque por debajo de los niveles considerados tóxicos en la literatura científica.

Por lo anteriormente expuesto, el presente trabajo busca resolver varios interrogantes, el primero es conocer y cuantificar el impacto de la agricultura sobre los suelos en estudio, especialmente a la variación del pH de los suelos bajo agricultura continua con respecto a los prístinos, siendo este el parámetro con el cual se cuantificará la relación de acidificación. El segundo es estudiar cuál o cuáles son las variables edáficas que explicarían esta variación del pH y/o si el aluminio intercambiable también es un posible causante de esta variación en los suelos de la Región Pampeana, como se ha demostrado en trabajos realizados en otros lugares del mundo Van Raij, (1991); Nettleton et al. (2001); Abreu et al. (2003); Mondal et al. (2004); Seybold et al. (2008); Pati y Mukhopadhyay (2010); Oliveira et al., (2018). Finalmente se determinará si los valores encontrados de aluminio intercambiable en la actualidad se encuentran en

niveles de toxicidad para los cultivos y/o si estos valores se asemejan o difieren a los de otros trabajos realizados anteriormente en la región como por ejemplo Millán et al. (2010).

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

Establecer la relación entre la acidificación y la presencia de aluminio en suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos con 25 años de uso agrícola.

1.2.2. Objetivos específicos.

1. Analizar el contenido de aluminio y acidez intercambiable en los suelos agrícolas en estudio y comparar con los umbrales de toxicidad descriptos en la literatura científica.
2. Determinar si la agricultura continua produjo diferencias en el pH actual y potencial en los suelos estudiados de la Región Pampeana.
3. Definir qué variables edáficas explican el cambio de los valores de pH.
4. Evaluar la variación del pH actual y potencial en los suelos agrícolas y prístinos.
5. Comparar si existen diferencias de comportamiento en la variación del pH actual y potencial entre los suelos Argiudoles y Hapludoles.

1.3. Hipótesis.

1.3.1. Hipótesis general.

La actividad agrícola continua produce un aumento del aluminio intercambiable.

1.3.2. Hipótesis específicas

1. La actividad agrícola continua acidifica los suelos pampeanos disminuyendo su pH.
2. El aluminio intercambiable es una de las causas de la acidificación de los suelos.
3. La disminución de las bases intercambiables es la variable que mejor explica el cambio del pH actual.
4. Existen diferencias en el comportamiento de Argiudoles y Hapludoles en cuanto al proceso de acidificación.

1.4. Organización de la Tesis.

La tesis contiene el Capítulo I, con la introducción general, el objetivo general y específicos, la hipótesis general y específicas, y la organización de la tesis.

En el Capítulo II, se presentan los materiales y métodos, la localización de los sitios de muestreo, metodología de muestreo de suelos, la metodología empleada para cada determinación, diseño del experimento y análisis estadístico.

El Capítulo III, con resultados y discusión, donde se analizan y se relacionan las variables edáficas como el aluminio intercambiable, pH actual, contenido de bases intercambiables, acidez intercambiable, materia orgánica y la textura para suelos agrícolas y prístinos en los dos grandes grupos en estudio (Argiudoles y Hapludoles) de la Región Pampeana.

Por último, el capítulo IV con las conclusiones generales, donde se sintetiza la información presentada en el Capítulo III (Resultados y discusión). Finalmente se presenta toda la bibliografía consultada y los anexos.

2. CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización de los sitios de muestreo.

Para cumplir con el objetivo de esta tesis, se formaron 16 grupos de suelos, cada grupo cuenta con un suelo pseudo-prístino como referencia y varios agrícolas (Tabla 1), que se agruparon según el tipo de suelo (Grandes Grupos) y la cercanía geográfica. Los sitios estudiados fueron los siguientes: en la provincia de Buenos Aires (Bragado, Los Toldos, Pergamino, Las Armas, Las Rosas, San Pedro, Balcarce, Chivilcoy, General Villegas, Roberts, Ferré, 25 de Mayo, Carlos Casares y Tres Lomas); en la provincia de Santa Fe (Acebal y Acevedo) y en la provincia de Córdoba (Pascanas). De acuerdo con la descripción de Oyarzabal et al. (2018); se tomaron 36 muestras de la unidad de vegetación (unidad 30) Pampa Ondulada, 30 muestras de la unidad de vegetación (unidad 31) Pampa Interior Plana, 6 muestras de la unidad de vegetación (unidad 32) Pampa Interior Occidental, y 6 muestras de la unidad de vegetación (unidad 33) Pampa Deprimida (Figura 2.1).

La unidad 30 (Pampa Ondulada) es una pseudoestepa mesofítica dominada por *Bothriochloa lagurioides* y *Nassella charruana*, que ocupa posiciones positivas con suelos profundos y bien drenados. La unidad 31 (Pampa Interior Plana) es una pseudoestepa de mesófitas con estepa de halófitas, se caracteriza por suelos profundos franco-arenosos. La unidad 32 (Pampa Interior Occidental) estepa psamofítica de *Sorghastrum pellitum* y *Elionurus muticus*, incluye dos comunidades zonales asociadas a diferencias edáficas y variantes ligadas al uso pastoril. La unidad 33 (Pampa Deprimida) son praderas de higrófitas y halófitas, en posiciones bajas con anegamiento prolongado y suelos ácidos y en posiciones negativas de valles fluviales, con suelos hidro y halomórficos (Oyarzabal et al., 2018). Cabe destacar que, en todas las unidades de vegetación, las especies nativas citadas fueron reemplazadas en su mayoría por la agricultura.

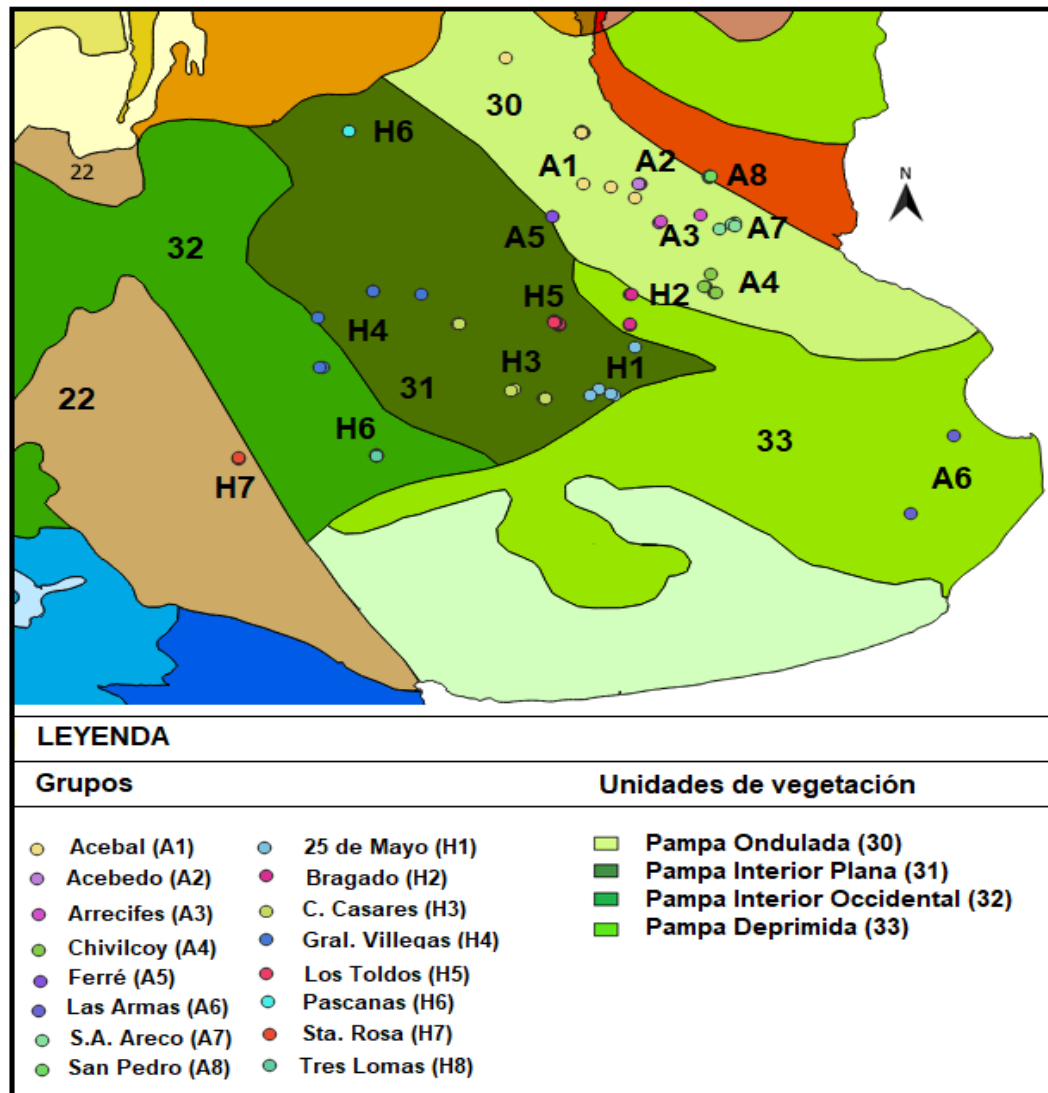


Figura 2.1. Ubicación de los sitios de muestreo sobre el mapa de las unidades de vegetación de la Argentina. Adaptado de Oyarzabal et al. (2018).

2.1.1. Datos de precipitación en la Región Pampeana.

Para caracterizar la precipitación de cada sitio se utilizó la base de datos de la Misión de Mediciones de Lluvias Tropicales (TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission, por sus siglas en inglés; Huffman et al., 2007). Esto se basa en el análisis de las imágenes derivadas que poseen una resolución espacial de 0, 25° (píxel de 2500 ha) y temporal diario (mm/h) (Lawford et al., 2007; 2012). Para cada píxel se obtuvieron los valores diarios de precipitación a partir de los cuales se calcularon los valores anuales.

2.2. Muestreo de suelos.

Las muestras de suelo fueron tomadas en lotes con una historia agrícola continua, de al menos 25 años, representada en su mayoría por una rotación: trigo/soja, maíz/soja bajo siembra directa (manejo representativo de la región). Las muestras de suelos en condición pseudo-prístina fueron tomadas de montes y lotes con pastizales (Sosa, 2012), cabe recordar que ya no hay suelos prístinos en la Región.

Las campañas de muestreo se realizaron entre junio 2016 y octubre 2017. Cada muestra fue compuesta de 5-10 submuestras tomadas al azar, en una profundidad de 0 - 20 cm, luego mezcladas y homogeneizadas. Se colocaron en bolsas plásticas, identificándolas con los siguientes datos: número de muestra, lote, sector, cultivo presente y/o antecesor, tipo de suelo, uso del suelo; las muestras fueron todas georeferenciadas con un GPS Garmin 62stc (Anexo 1).

2.3. Determinaciones de laboratorio.

Todas las muestras fueron secadas al aire y tamizadas por malla (0,5 y 2 mm), el material vegetal identificable que quedaba sobre el tamiz se eliminó. A todas las muestras se les realizaron las determinaciones que se detallan a continuación:

2.3.1. Determinación del pH actual y potencial.

Para estas determinaciones se utilizó la metodología propuesta por Thomas (1996). Para la medición del pH actual se empleó una suspensión suelo – agua (1:2,5) y para el pH potencial (1:2,5) con cloruro de potasio KCl (1M). Las suspensiones se agitaron por 10 minutos y luego se dejaron reposar una hora (pH actual) y dos horas (pH potencial). Para ambas determinaciones primero se procedió a la calibración del potenciómetro con soluciones buffer (4.0 – 7.0) para posteriormente realizar las mediciones de pH agitando suavemente la suspensión.

2.3.2. Materia orgánica del suelo (MOS).

La cantidad de carbono orgánico oxidable (CO) fue determinada por el método de combustión húmeda (Walkley y Black, en Jackson 1982). La técnica consiste en someter una cantidad de suelo seco y tamizado a la acción oxidante del dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico. La titulación se realizó con sulfato amónico ferroso (Sal de Mohr) valorado y por diferencia entre el blanco y la muestra, se calculó el CO que expresado en porcentaje. Dado que con este método se determina el carbono orgánico, Walkley y Black (1934) encontraron que el porcentaje de C recuperado promediaba el 76% entonces propusieron el factor de 1.38 para expresar los resultados en porcentaje de carbono orgánico total (COT). Finalmente, el porcentaje de materia orgánica del suelo (MOS) se obtuvo multiplicando el COT por el factor 1,72.

2.3.3. Bases intercambiables.

Para la determinación de bases intercambiables: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K), se utilizó el método de extracción con acetato de amonio (NH_4Ac) 1N a pH 7 (Summer y Miller, 1996). La determinación se realizó mediante espectrofotómetro de llama y de absorción atómica (Sparks, 1996; Azcarate y Kloster, 2010).

2.3.4. Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE).

La CICE es la resultante de las cargas fijas y variables de las arcillas y se calculó mediante los valores de Hissink (Conti y Guiffre, 2014), de acuerdo a la fórmula:

$$T = S + H$$

Donde:

S= es la cantidad de bases intercambiables en el complejo.

H= es la cantidad de Al^{3+} y H^+ en el complejo.

2.3.5. Acidez intercambiable.

Para la determinación de acidez intercambiable (acidez i) se utilizó el método de titulación directa expuesto por Sims (1996). En la extracción se empleó una suspensión (1:10) suelo - cloruro de potasio KCl (1M). Para la titulación se utilizó como indicador fenolftaleína y se tituló con hidróxido de sodio NaOH (0,1 M) hasta obtener un color rosa permanente y se registró el gasto de NaOH (muestra y blanco). La cantidad de NaOH utilizada en la titulación es equivalente a la concentración de acidez intercambiable del suelo. Para el cálculo de la acidez intercambiable se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Acidez intercambiable (cmol}_c\text{kg}^{-1}) = \frac{(a-b)}{s} * (M * 100)$$

Donde:

a= mL de NaOH gastados en la muestra

b= mL de NaOH gastados en el blanco

M= molaridad de la solución de NaOH (0,1 M)

s= peso en gramos de la muestra de suelo

2.3.6. Aluminio intercambiable.

Para la determinación de aluminio intercambiable (Al_i) se utilizó el método de titulación directa propuesto por Sims (1996). Luego de la titulación de la acidez intercambiable, se agregó KF (1M) como indicador y se procedió a la titulación con ácido clorhídrico HCl (0,1M) hasta la desaparición del color rosa y se registró el gasto de HCl (muestra y blanco). La cantidad de HCl utilizada en la titulación es equivalente a la concentración de aluminio intercambiable del suelo. Para la determinación del aluminio intercambiable se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Aluminio intercambiable (cmol}_c\text{kg}^{-1}) = \frac{(a-b)}{s} * (M * 100)$$

Donde:

a= mL de HCl gastados en la muestra

b= mL de HCl gastados en el blanco

M= molaridad de la solución de HCl (0,1 M)

s= peso en gramos de la muestra de suelo

Coscione et al. (1998) indicaron que este método tiene mayor sensibilidad en relación con los métodos colorimétricos para la determinación de aluminio intercambiable, ya que está sujeto a menor interferencia con los iones presentes en el extracto.

2.3.7. Textura del suelo.

Esta variable se determinó mediante el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962). Para llevar a cabo dicha técnica se utilizó como agente dispersante hexametáfosfato de sodio (calgón) en una relación (1:2,5); 40 g de suelo y 100 mL de calgón, se agitó por 30 minutos y se vertió la suspensión en una probeta que se llevó hasta 1000 cm³ con agua destilada, se agitó y finalmente se midió la densidad con un hidrómetro.

La primera lectura se realizó a los 40 segundos, en este tiempo la porción de arena ya se depositó. La segunda lectura se realizó después de 4 horas, con la cual se determinó el porcentaje de arcilla y por diferencia se obtuvo el porcentaje de limo. Los resultados se muestran en el Anexo 1.

2.4. Diseño del experimento.

Con el total de las muestras extraídas se formaron 16 grupos de suelos, donde los criterios de agrupación fueron el Gran Grupo al que pertenecen, la unidad de vegetación, el área geográfica y la textura del suelo. Además, cada grupo cuenta con un suelo prístino como referencia y varios agrícolas. Del total de 78 muestras; 62 pertenecen a lotes bajo agricultura continua de al menos 25 años y 16 de condición prístina, correspondientes a los dos Grandes Grupos de suelo (Argiudoles y Hapludoles) de la Región Pampeana (Tabla 1).

Tabla 1. Grupos y factores de estudio en suelos de la Región Pampeana.

Sector	Código	Unidad de vegetación	Precipitación mm	Número de muestras		
				Prístino	Agrícola	Total
Acebal	A1	30	1195,61	1	16	17
Acevedo	A2	30	1264,22	1	2	3
Arrecifes	A3	30	1296,31	1	2	3
Chivilcoy	A4	30	1297,08	1	2	3
Ferré	A5	30	1226,72	1	1	2
Las Armas	A6	33	1143,07	1	1	2
S.A. Areco	A7	30	1354,18	1	3	4
San Pedro	A8	30	1270,35	1	3	4
25 de Mayo	H1	31	1094,25	1	4	5
Bragado	H2	33	1200,34	1	3	4
Carlos Casares	H3	31	1095,21	1	7	8
Gral. Villegas	H4	31	1009,76	1	5	6
Los Toldos	H5	31	1145,21	1	8	9
Pascanas	H6	31	991,39	1	1	2
Sta. Rosa	H7	32	909,71	1	1	2
Tres Lomas	H8	32	935,41	1	3	4
Total				16	62	78

Leyenda: A= Argiudoles, H= Hapludoles; y el número ubica al grupo al que pertenece.

Los factores de estudio fueron: el uso de la tierra (prístinos y agrícolas) y el tipo de suelo (Argiudoles y Hapludoles).

2.5. Análisis estadístico.

Para cumplir con el primer objetivo específico, se determinó la cantidad de aluminio y acidez intercambiable y se los comparó con los umbrales de toxicidad citados en la literatura. Para el segundo objetivo específico, se realizó un análisis de t apareada con las variables pH actual y potencial con la diferencia de medias entre suelos prístinos y agrícolas de cada grupo (16 pares).

Para el tercer objetivo específico, se efectuaron análisis de correlación y regresión lineal entre el pH actual y potencial y las variables edáficas: acidez y aluminio intercambiable, suma de bases intercambiables, capacidad de intercambio catiónico

efectiva, materia orgánica y textura. Todas las variables utilizadas en este objetivo fueron obtenidas con la diferencia entre suelos agrícolas y prístinos excepto la textura, la cual se utilizó el valor promedio.

Para el cuarto objetivo específico, se realizaron varios análisis que se detallan a continuación: análisis de regresión lineal simple entre acidez intercambiable, aluminio intercambiable, suma de bases intercambiables, capacidad de intercambio catiónico efectiva y materia orgánica (variables regresoras), el pH actual y potencial (variable dependiente). Un análisis de regresión lineal múltiple con las variables que mejor explicaron la variación del pH actual y potencial. Estos análisis se determinaron con todas las muestras de suelos.

Para el quinto objetivo específico, se realizaron los mismos análisis del cuarto objetivo, con la finalidad de determinar las diferencias en la variación del pH actual y potencial en los Grandes Grupos de suelos. Adicionalmente, se efectuaron análisis de estadística descriptiva, correlación de Pearson y de componentes principales (ACP). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico Infostat, (Di Rienzo et al., 2018).

3. CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Medidas de estadística descriptiva y análisis de componentes principales (ACP) de los suelos estudiados.

3.1.1. Estadística descriptiva.

En el análisis de estadística descriptiva del total de las muestras ($n=78$) resultó que el pH actual y potencial tuvieron los valores más bajos de coeficientes de variación respecto de las otras variables analizadas (CV) 7,64 y 9,58%, respectivamente. La suma de bases intercambiables (15,2%) y CICE (15,0%) valores medios de CV. El Al_i (26,5%) y MOS (27,5%) valores altos de CV. La acidez i (37,6%) y el % de arena (44,6%) valores muy altos de CV. La categorización de los CV se realizó de acuerdo con la clasificación de Pimentel (1984). En todas las variables los valores de las medias y medianas resultaron similares, indicando distribuciones poblacionales simétricas.

Tabla 2. Resumen de las medidas descriptivas de los suelos estudiados de la Región Pampeana. Min: Mínimo; Max: Máximo; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación (%).

Variables	Medidas de resumen estadístico (n=78)					
	Media	Mediana	Min	Max	E.E.	CV
pH actual	5,82	5,81	5,1	7,19	0,05	7,64
pH potencial	4,98	5,02	4,12	6,24	0,05	9,58
Acidez i (cmol _c kg ⁻¹)	0,15	0,14	0,06	0,32	0,01	37,63
Al_i (cmol _c kg ⁻¹)	0,08	0,08	0,05	0,16	<0,01	26,53
Suma de bases (cmol _c kg ⁻¹)	13,95	13,53	10,18	19,23	0,24	15,22
CICE (cmol _c kg ⁻¹)	14,03	13,61	10,28	19,28	0,24	15,02
MOS (%)	2,62	2,15	1,3	5,23	0,08	27,52
Arcilla (%)	22,4	20	15	35	0,58	22,84
Limo (%)	41,3	24	15	70	1,44	30,82
Arena (%)	36,2	37	10	70	1,83	44,58
Precipitación (mm/año)	1245,29	1254,6	951,11	1445,83	13,72	9,73

Leyenda: se incluyen suelos prístinos y agrícolas. El valor para la precipitación es el promedio anual entre los años 2015-2017 (Huffman et al., 2007).

La variabilidad del pH actual fue notablemente menor al del resto de las variables, a pesar de que las muestras poseen una amplia distribución en la Región Pampeana. Otros

autores (Cox et al., 2006; Gregorini et al., 2016) hallaron que las propiedades con menor variación son aquellas que son intrínsecas de la génesis del suelo como lo es su pH. El CV de la MOS fue similar al reportado por Kemerer y Melchiori (2012) quienes en suelos Molisoles y Vertisoles encontraron valores semejantes a los de este trabajo de (CV 22,7%).

3.1.2. Análisis de componentes principales (ACP).

El ACP se aplicó como un método matemático de reducción de información, los resultados del ACP se representan en el *biplot* (Figura 3.1). Este análisis reveló que las dos primeras componentes principales (CP 1 y CP 2) explicaron el 72,9 % de la variación total de la información, es decir, 50,9 % y 22,0 % por la CP 1 y la CP 2, respectivamente. Puede verse gráficamente como los suelos prístinos se separan claramente de los suelos agrícolas.

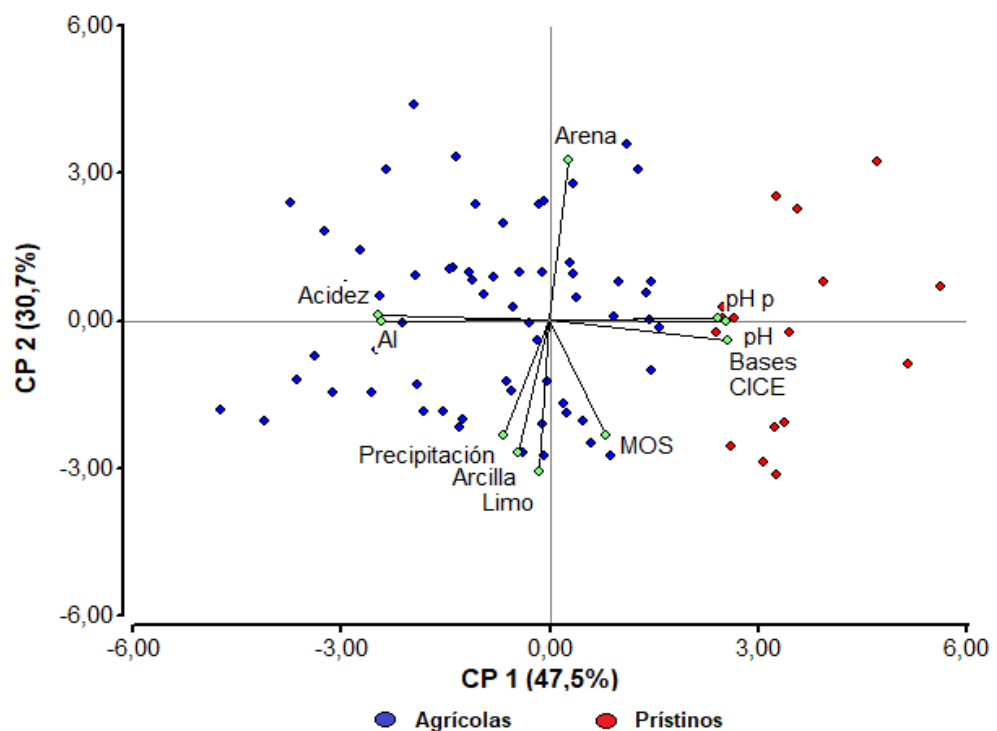


Figura 3.1. Análisis de componentes principales entre las propiedades químicas y físicas de todos los suelos estudiados.

En el caso del Al_i las correlaciones negativas más altas después del pH actual fueron con CICE y Ca ($r = -0,77$ y $-0,71$ respectivamente, $p < 0,0001$); y la más baja fue con MOS ($r = -0,22$ $p < 0,05$), este resultado concuerda con Jiang et al. (2013) quienes afirmaron que la materia orgánica reduce la acidez del suelo al neutralizar los iones de hidrógeno y aluminio ejerciendo un efecto tampón. La única correlación positiva de Al_i fue con la acidez i ($r = 0,80$ $p < 0,0001$).

Las poblaciones de suelos definidas por el ACP (prístinos y agrícolas), resultaron confiables dado que, en este caso, la correlación cofenética fue muy significativa e igual a 0,96. Es decir que las distancias representadas en el *biplot* se corresponden con las distancias estadísticas que existen entre los suelos. Los resultados del ACP mostraron que los suelos presentaron diferentes valores de pH dados por su diferente uso.

3.2. Resultados y discusión del objetivo específico 1: Análisis del contenido de aluminio y acidez intercambiable en los suelos agrícolas y verificar su potencial toxicidad para los cultivos.

3.2.1. Contenido de aluminio intercambiable (Al_i).

El Al es el elemento clave en este trabajo de tesis, ya que se trata de evaluar su contenido y si éste es la causa de la acidificación de los suelos. En los suelos agrícolas el valor mínimo de Al_i fue de $0,06 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ y el máximo de $0,16 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$. En los suelos pseudo-prístinos se utilizó el valor de $0,05 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ el cual es el valor mínimo de sensibilidad de esta técnica (Sims, 1996). En la Figura 3.2 se muestra la distribución del contenido de Al_i en el total de los suelos evaluados, también se observa que en todos los casos el valor de Al_i de los suelos agrícolas estuvo por encima del valor de los suelos prístinos y por consiguiente su incremento en estos suelos.

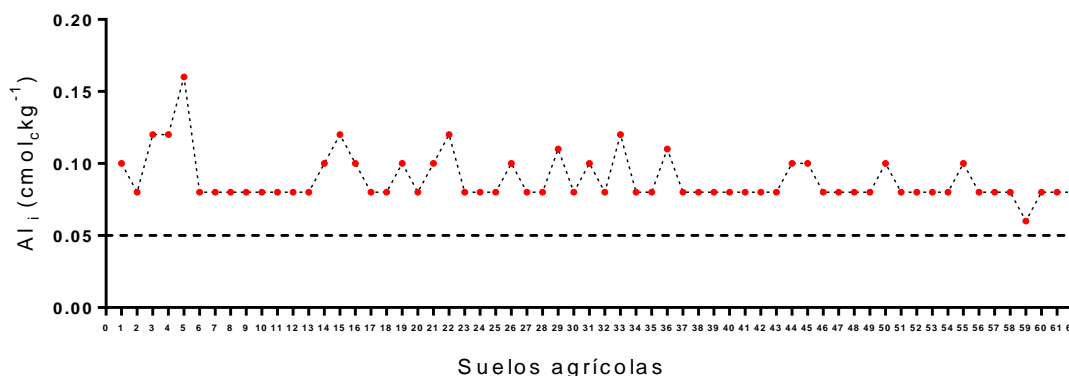


Figura 3.2. Valores de Al_i (0-20 cm) en los suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana. La línea horizontal entrecortada indica el valor del Al_i de los suelos prístinos.

En el ACP se mencionó la correlación negativa y altamente significativa entre el Al_i con el pH actual y potencial, esto coincide con Iturri (2015) quien observó en los suelos del área central argentina que cuando el pH desciende, los contenidos de óxidos amorfos de Al, Mn y Fe aumentan y afirma que la ocurrencia de estos fenómenos en suelos del área estudiada podría acarrear un aumento de Al en la solución edáfica. Además, no se encontró correlación entre el Al_i con el tamaño de partícula. Debido a la elevada correlación negativa encontrada entre el Al_i y Ca, se realizó un análisis de regresión lineal entre ambas variables el cual fue significativo ($p < 0,001$), explicando en un 21% que la variación del Al_i es causada por la del Ca_i . Según el modelo encontrado por cada unidad de descenso de Ca_i habría un incremento de $0,007 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ de Al_i .

$$Al_i = -0,0067(Ca_i) + 0,15$$

Esta relación negativa puede ser explicada al uso agrícola continuo del suelo que genera la disminución del pH, debido a factores como el desbalance entre la extracción y la reposición de nutrientes básicos como el Ca (Vázquez et al., 2014). Sin embargo, en el sudeste bonaerense Di Gerónimo et al. (2016) no verificaron presencia de Al_i concluyendo que la pérdida de bases intercambiables (Ca^{+2} y Mg^{+2}) fue reemplazada por protones (H^+). En esta tesis, con este resultado se puede afirmar que el impacto de

la agricultura provocó un incremento de la acidez y de esta manera su contenido de Al_i que pasó a ocupar los sitios de intercambio.

3.2.1.1. Niveles de toxicidad del Al_i .

Los umbrales de Al_i reportados por diferentes autores, Sosa (1994); Casierra y Aguilar (2007), consideran al Al_i como un problema en el suelo y/o tóxico para las plantas cuando se presentan valores superiores a $1,24 - 2 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ ($11,16 - 18 \text{ mg kg}^{-1}$). Aunque estos valores pueden ser variables según las condiciones edáficas y genéticas de las especies vegetales (Zapata, 2004).

Así mismo, Casierra y Aguilar (2007) determinaron que cuando el porcentaje de saturación de Al en relación con los cationes intercambiables es mayor que 25% y si la relación $(Ca + Mg + K)/Al$ es menor o igual que 1 (uno); en cualquiera de estos casos es necesaria la implementación de enmiendas con el fin de reducir el efecto tóxico del Al para las plantas. En la Tabla 3 se muestran los límites tóxicos del Al_i y los resultados de las relaciones anteriormente mencionadas de los suelos en estudio.

Tabla 3. Umbrales de toxicidad de Al_i en los suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana. Mín.=mínimo; Máx.= máximo.

Umbrales de toxicidad de Aluminio			Valores encontrados		
Relación	Referencia	Nivel tóxico	Media	Mín.	Máx.
Concentración Al	Sosa, 1984	$1,24 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$	0,09	0,06	0,16
Concentración Al	Casierra y Aguilar, 2007	$2 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$	0,09	0,06	0,16
% Saturación Al	Casierra y Aguilar, 2007	> 25%	0,7	0,5	1,2
$(Ca+Mg+K)/Al$	Casierra y Aguilar, 2007	≤ 1	143,3	215	80,6

Con los resultados obtenidos en esta tesis y mostrados en la Tabla 3, se concluye que los valores de Al_i en los suelos estudiados se encuentran muy por debajo de los umbrales de toxicidad anteriormente descriptos, lo cual concuerda con Millán et al. (2010) y Vázquez (2011). Sin embargo, en esta tesis se pudo determinar un incremento

promedio de Al_i de $0,05 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ con respecto a los valores reportados de los autores citados anteriormente.

Por otra parte, Pellegrini et al. (2016) evaluaron la capacidad de liberación de Al en el horizonte superficial de un Argiudol típico de La Plata (Buenos Aires), encontrando concentraciones hasta de $1,85 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ de Al_i a un pH 3,83. Este valor de pH no se ha registrado a nivel de suelo en producción en la Región Pampeana, sin embargo, alcanzaría los niveles de Al soluble-intercambiable considerados tóxicos para la mayor parte de las especies. A diferencia de nuestra región, Ikiriko et al. (2016) reportaron en suelos tropicales de Nigeria, valores de $0,6 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ de Al_i a un pH de 4,9; Baquy et al. (2017) en dos Ultisoles del sur de China valores de 3,0 - 2,30 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ a un pH de 4,5. Este último con una mayor concentración de Al_i que un suelo de la Región Pampeana a un nivel de pH extremo como el determinado por Pellegrini et al. (2016). Esta diferencia en las concentraciones de Al_i puede ser explicada por los diferentes materiales parentales de los suelos, ya que este tiene influencia en el contenido Al_i (Fassbender, 1987; Porta et al., 1999; Bloem, 2002; Zapata, 2004; Seybold et al., 2008).

3.2.2. Magnitud de la acidez i .

En los suelos agrícolas el valor mínimo de acidez i fue de $0,09 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ y el máximo de $0,32 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, el valor promedio fue de $0,17 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ y la mediana de $0,16 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$; mientras que para los prístinos la media y la mediana fue de $0,08 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$. Estas concentraciones sobrepasan a los valores reportados por Álvarez et al. (2018) quienes encontraron valores menores a $0,10 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ a esta profundidad (0-20 cm) en suelos agrícolas de la región. En la Figura 3.3 se muestra la distribución de la magnitud de la acidez i en los suelos agrícolas, se observa que en todos los casos la

acidez i estuvo por encima del valor medio de los suelos prístinos, evidenciando un incremento en los suelos agrícolas.

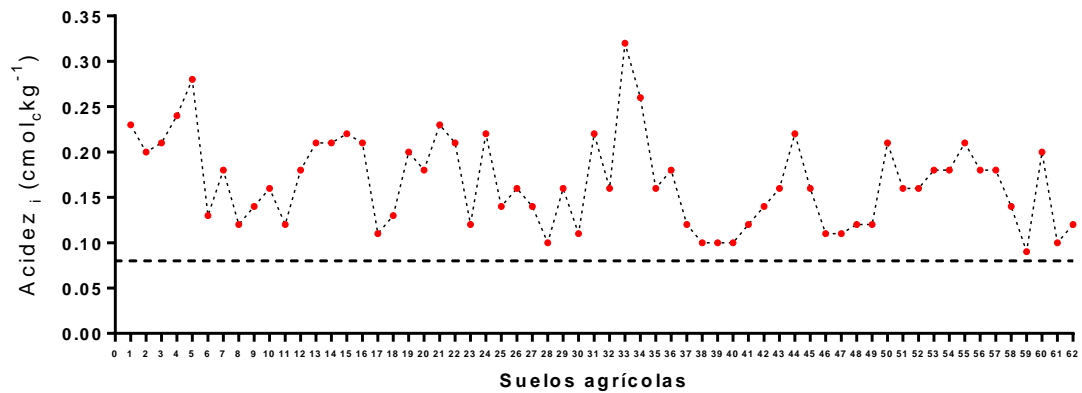


Figura 3.3. Valores de Acidez i (0-20 cm) en los suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana. La línea horizontal entrecortada indica el valor de la media de Acidez i de los suelos prístinos.

Con este resultado se puede afirmar que el impacto de la agricultura, debido al reemplazo de las bases intercambiables por protones (H^+) principalmente, provocó el incremento de la acidez i en los suelos agrícolas.

Lo anteriormente expuesto puede ser explicado por la correlación negativa y altamente significativa encontrada entre la acidez i y las bases intercambiables Ca y Mg ($r = -0,77$ y $-0,61$ $p < 0,0001$) respectivamente. Resultado similar se observó en la correlación entre la acidez i y el pH actual ($r = -0,81$ $p < 0,0001$) esto como producto de la actividad agrícola. Debido a la correlación negativa encontrada entre la acidez i y las bases intercambiables, se realizó un análisis de regresión lineal entre ambas variables (Figura 3.4) el cual fue altamente significativo ($p < 0,0001$). Por otra parte, no se encontró correlación entre la acidez i con el tamaño de partícula a diferencia de lo reportado por Álvarez et al. (2019) en suelos de la región.

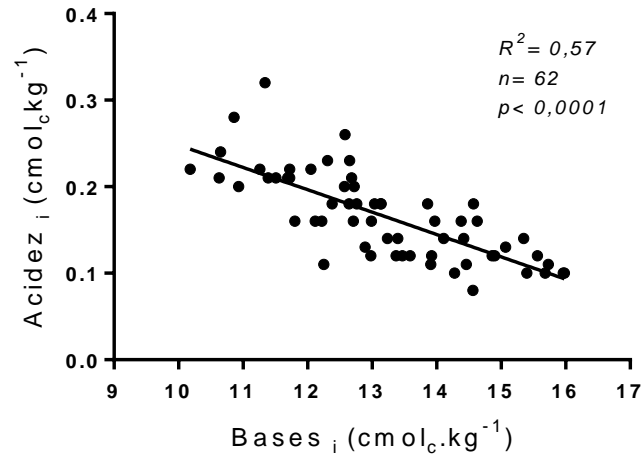


Figura 3.4. Relación entre las bases intercambiables ($Ca+Mg+K+Na$) y la acidez i (0-20 cm) en suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana.

Esta relación mostró que el 57% de la variación de la acidez i se encuentra explicada por la variación de las bases intercambiables. El modelo de regresión fue:

$$Acidez\ i = -0,026(Bases\ i) + 0,51$$

Según el modelo encontrado y considerando la mediana de acidez i de los suelos prístinos de $0,08\text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, la suma de bases intercambiables mínima para tener ese valor de acidez i debería ser de $16,54\text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ y por cada unidad de descenso de las bases intercambiables habría un incremento de $0,026\text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ de acidez i . A diferencia de lo que ocurre en suelos de Nigeria donde encontraron valores de acidez i entre $2,1$ a $3,2\text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ con un pH comprendido entre $4,5 - 4,9$ (Ikiriko et al. 2016). Esta diferencia en la concentración de acidez i puede ser explicada por el diferente material parental y el tipo de arcilla, los cuales tienen influencia en el contenido de esta variable (Fassbender, 1987; Porta et al., 1999; McGahan et al., 2003; Seybold et al., 2008; Oliva, 2009), como ya fue explicado para el Al_i .

3.3. Resultados y discusión del objetivo específico 2: determinar si la agricultura continua produjo diferencias en el pH actual y potencial en los suelos estudiados de la Región Pampeana.

Para la realización de este objetivo se procedió a obtener las diferencias de las variables a analizar entre los suelos prístinos y agrícolas en los 16 grupos de suelos formados (Tabla 1). Esta diferencia se obtuvo restando el promedio de los suelos agrícolas con el prístino de cada grupo ($\Delta\text{pH} = \text{pH agrícola} - \text{pH prístino}$), resultando un total de 16 diferencias (Tabla 6).

3.3.1. Variación en el pH actual.

Varios trabajos realizados en la Región Pampeana concluyeron que el uso agrícola continuo del suelo generó la disminución del pH debido principalmente al desbalance entre la extracción y la reposición de nutrientes básicos (Ca, Mg, K) (Sainz Rozas et al., 2011; Cruzate y Casas, 2012; Vázquez et al., 2014) y/o a la aplicación de fertilizantes de reacción ácida (Iturri et al., 2010; Vázquez y Pagani, 2012). Este efecto de la fertilización nitrogenada también se fue observado por Chien et al. (2001) en suelos molisoles de China. En la Figura 3.5 se muestra la distribución promedio por grupo del pH actual, en todos los casos el valor del pH actual de los suelos agrícolas estuvo por debajo del valor de los suelos prístinos.

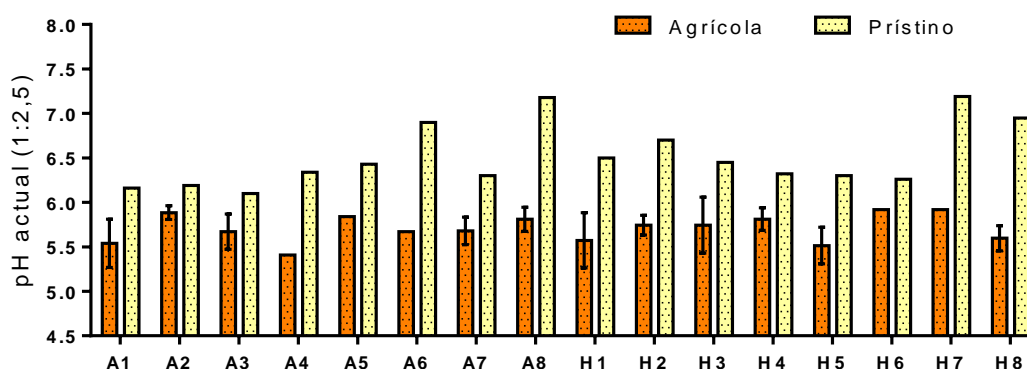


Figura 3.5. Valores de pH actual (0-20 cm) en suelos de los 16 grupos estudiados de la Región Pampeana. Las barras indican el error estándar respecto a la media. A=Argiudoles; H=Hapludoles.

El análisis de t apareada mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) para el Δ pH actual (Tabla 4), esta disminución del pH actual evidencia el impacto de la agricultura. Este análisis de t apareada ha sido también utilizado en investigaciones similares en otras partes del mundo, Veenstra (2010) en Iowa - Estados Unidos y Li et al. (2019) en China. Los valores más bajos de pH actual se encontraron en los grupos Chivilcoy (A4) y Acebal (A1) en los Argiudoles (pH 5,37 y 5,54) y en Los Toldos (H5) y 25 de Mayo (H1) en los Hapludoles (pH 5,52 y 5,57; respectivamente). En promedio los suelos agrícolas Argiudoles mostraron un valor más bajo de pH con respecto a los Hapludoles (5,68 y 5,73) respectivamente. Sin embargo, esta diferencia no fue significativa ($p > 0,05$). El valor de pH más bajo encontrado en una muestra de suelo fue 5,1 en Carlos Casares (grupo H3).

El promedio del pH actual para los suelos prístinos fue de 6,52 y 5,71 para los agrícolas, existiendo una disminución media de 0,81 unidades que representa el 12,4% de disminución respecto a los prístinos. Esta disminución del pH es mayor comparada a los suelos de Iowa que en 50 años de uso agrícola disminuyeron 0,2 unidades de pH actual (Veenstra, 2010), esta mínima disminución según el autor se atribuyó a la reposición de nutrientes por uso realizada por los agricultores; y una disminución del pH menor comparada a la de los suelos de Chengdu (China) que en 30 años de agricultura el pH descendió 1,20 unidades (Li et al., 2019). Este mayor descenso del pH posiblemente se deba a que estos suelos se encuentran en una región tropical.

Tabla 4. Análisis de t apareada del Δ pH actual (1: 2,5) en los suelos estudiados de la Región Pampeana. DE= desviación estándar; LS= límite superior.

Obs (1)	Obs (2)	n	Media (1)	Media (2)	Media (dif)	DE (dif)	LS (95%)	p-valor
Agrícola	Prístino	16	5,71	6,52	-0,81	0,36	-0,66	$p < 0,0001$

La disminución porcentual encontrada (12,4%) es semejante a la reportada por Heredia et al. (2003), aunque en este trabajo no se determinó la diferencia con los suelos prístinos, determinaron en la zona Norte de Buenos Aires que la agricultura provocó una caída anual del pH actual en 0,04 unidades, indicando una merma total del 12% y en la zona Oeste una caída anual de 0,03 unidades, que es el 8,5% de disminución de pH actual. Estas diferencias podrían deberse a la distinta cantidad de años bajo producción agrícola, ya que la zona Oeste entró en producción agrícola más tardía que la zona Norte debido al corrimiento de las isoyetas (Sierra et al, 1994; Balsa, 2001).

El promedio de pH actual 5,7 (suelos agrícolas) es moderadamente ácido de acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Burt, 2014), y se encuentra dentro del rango (5,5-5,9) reportado en otros trabajos realizados en la Región Pampeana (Cruzate y Casas, 2003; Gelati y Vázquez, 2008; Sainz Rozas et al., 2011). Se puede afirmar que el valor promedio del pH actual de los suelos agrícolas estudiados (pH 5,7) no presentaría limitación para el normal desarrollo en la mayoría de los cultivos (Fassbender, 1987; Porta et al., 1999; Stevens et al., 2009; Goulding, 2016).

Sin embargo, para determinados cultivos como por ejemplo en el de soja se ha reportado una disminución del 20% en el rendimiento a un pH de 5,7 (Magra y Ausilio, 2004) y la alfalfa puede disminuir hasta el 42% de su rendimiento cultivada al mismo nivel de pH (Romero, 2003). El crecimiento de la canola se verá afectada a $\text{pH} < 5,65$ (Baquy et al., 2017), la producción de maíz decrece a $\text{pH} < 5,5$ y la de trigo a $\text{pH} < 6$ (Vázquez, 2011). Por lo que un suelo con 25 o más años de agricultura y un pH promedio de 5,7 o menor, se debería comenzar a tener en consideración el pH del suelo ya que puede afectar la producción.

El impacto de la agricultura sobre el pH también ha sido estudiado en otras partes del mundo, Guo et al. (2010) indicaron que el uso intensivo de la tierra y la aplicación

de fertilizantes nitrogenados ha acelerado considerablemente la acidificación del suelo en las últimas tres décadas en algunos Molisoles de China. Hollier y Reed (2005) indicaron que, en algunas regiones de Australia, ha habido disminución en una unidad de pH en los últimos 20 años y algunas áreas agrícolas han perdido la capacidad de cultivar especies agrícolas como la alfalfa, por su susceptibilidad a los suelos ácidos.

Como se mostró en la Figura 3.5, existe variabilidad en las disminuciones del pH actual en los grupos evaluados. Esto es importante de destacar, ya que el valor de disminución encontrado en este trabajo parecería similar a otros. Sin embargo, cada zona presentó disminuciones disímiles, por lo que para mayor comprensión sería importante definir o distinguir las áreas donde la investigación en este tema a futuro debería profundizarse. Esta variabilidad tiene que ser comprendida, estudiada y mapeada a la hora de determinar prácticas de remediación de estos suelos como plantean Takele et al. (2018).

3.3.2. Variación en el pH potencial.

En la Figura 3.6 se muestra la distribución del promedio por grupo del pH potencial en los suelos estudiados, en todos los casos los valores del pH potencial estuvieron por debajo de los valores del pH actual. El valor promedio para pH potencial fue de 4,92; lo cual sugiere que estos suelos tendrían alta potencialidad de incrementar su acidez a medida que se produzcan pérdidas de bases (Selinger, 2017), además de la posibilidad de liberar y aumentar la concentración de Al (Presutti et al., 2017). Los valores más bajos de pH potencial se encontraron en los grupos Chivilcoy (A4) y Las Armas (A6) en Argiudoles (4,26 y 4,51; respectivamente); y en Los Toldos (H5) en Hapludoles (4,59).

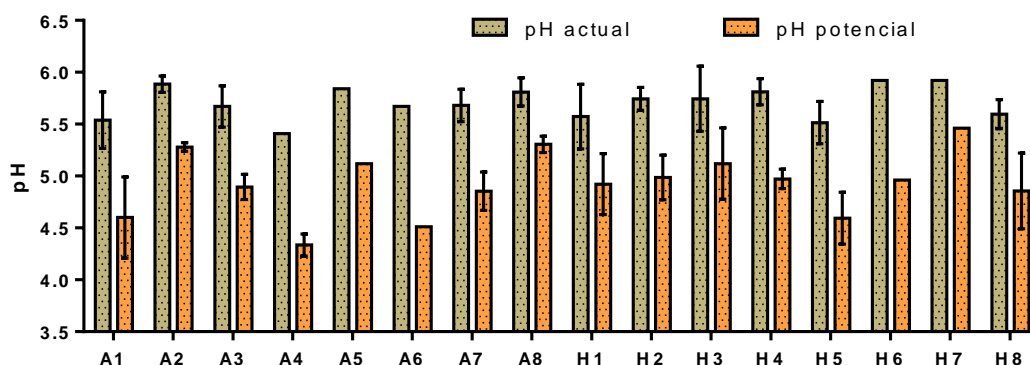


Figura 3.6. Valores de pH actual (0-20 cm) en suelos de los 16 grupos estudiados de la Región Pampeana. Las barras indican el error estándar respecto a la media. A=Argiúdoles; H=Haplúdoles.

El análisis de t apareada mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) para el Δ pH potencial entre los 16 grupos estudiados, con lo cual se evidencia la potencialidad de acidificación de estos suelos (Tabla 5). El promedio de pH potencial en los suelos agrícolas encontrado en esta tesis (4,92) es semejante al presentado por Millán et al. (2010) y Vázquez, (2011) el cual fue en promedio de 4,97.

Tabla 5. Análisis de t apareada del Δ pH potencial (1: 2,5) en los suelos estudiados de la Región Pampeana. pH P= pH potencial; pH A= pH actual; DE= desviación estándar; LS= límite superior.

Obs (1)	Obs (2)	n	Media (1)	Media (2)	Media (dif)	DE (dif)	LS (95%)	p-valor
pH P	pH A	16	4,92	5,71	-0,79	0,19	-0,71	$p < 0,0001$

La disminución del pH potencial fue de 0,79 unidades; con valores de disminución mayores a 1,0 se podría inferir que un proceso de acidificación está en progreso (Gandois et al., 2011). Adicionalmente, se encontró una elevada correlación positiva y altamente significativa entre el pH actual y potencial ($r = 0,75$; $p < 0,0001$).

3.4. Resultados y discusión del objetivo específico 3: Definir qué variables edáficas explican el cambio de los valores del pH actual y potencial.

Para la realización de este objetivo se procedió a obtener las diferencias entre los suelos prístinos y agrícolas de todas las variables edáficas analizadas en los 16 grupos formados. En la Tabla 6 se muestran los valores obtenidos para cada variable. Las variables analizadas fueron: pH actual, pH potencial, acidez y aluminio intercambiable, bases intercambiables, CICE, MOS y los porcentajes de arcilla, limo y arena. En el caso de estas variables físicas en lugar de las diferencias se tomó el promedio de cada grupo.

Tabla 6. Valores delta Δ de las variables estudiadas en los grupos de suelos la Región Pampeana. pH p= pH potencial.

Variables analizadas (n=16)										
Grupos	Δ pH	Δ pH p	Δ Acidez _i	Δ Al _i	Δ Bases _i	Δ CICE	Δ MOS	Arcilla	Limo	Arena
A1	-0,62	-0,94	0,09	0,05	-4,77	-4,73	-1,01	28,8	51,8	19,4
A2	-0,31	-0,61	0,04	0,03	-2,58	-2,56	-0,67	31,7	51,7	16,7
A3	-0,43	-0,78	0,09	0,04	-5,79	-5,75	-0,83	22,7	55,3	22,0
A4	-0,98	-1,03	0,14	0,06	-4,00	-3,94	-0,43	23,0	42,7	34,3
A5	-0,59	-0,72	0,04	0,03	-4,54	-4,52	-1,26	24,0	50,5	25,5
A6	-1,23	-1,16	0,14	0,03	-3,54	-3,51	-2,77	20,0	41,5	38,5
A7	-0,62	-0,83	0,04	0,04	-4,45	-4,42	-1,15	22,3	58,3	19,5
A8	-1,37	-0,54	0,06	0,04	-2,40	-2,36	-1,07	20,3	48,8	31,0
H1	-0,93	-0,72	0,15	0,05	-4,80	-4,75	-0,31	17,8	22,6	59,6
H2	-0,96	-0,76	0,07	0,04	-2,03	-1,99	-0,72	22,5	35,3	42,3
H3	-0,71	-0,62	0,07	0,03	-3,90	-3,87	-0,43	20,9	33,6	45,5
H4	-0,51	-0,84	0,04	0,03	-3,43	-3,40	-0,62	17,5	24,7	57,8
H5	-0,79	-0,92	0,04	0,03	-3,25	-3,21	-0,64	19,4	39,6	41,0
H6	-0,34	-0,96	0,06	0,03	-2,15	-2,12	-0,34	19,0	51,0	30,0
H7	-1,27	-0,46	0,03	0,01	-4,67	-4,66	-0,62	19,0	44,0	37,0
H8	-1,35	-0,74	0,06	0,03	-3,43	-3,40	-0,48	17,3	16,3	66,5

Leyenda: los valores de arcilla, limo y arena están expresados en promedio porcentual.

Las variables Δ Al_i y Δ acidez_i fueron significativas ($p < 0,0001$) analizados con una Prueba t apareada (Tabla 7). Para el caso del Al_i se tomó como referencia el valor mínimo de sensibilidad del método utilizado 0,05 cmol_c.kg⁻¹ (Sims, 1996) para los suelos prístinos. De esta manera, se determinó un incremento de 0,04 cmol_c.kg⁻¹ de Al_i y un incremento de 0,08 cmol_c.kg⁻¹ para la acidez_i.

Tabla 7. Análisis de t apareada de los valores delta Δ de Al_i y $Acidez_i$ en los suelos estudiados de la Región Pampeana.; DE= desviación estándar; LI= límite inferior.

Variables	Obs (1)	Obs (2)	n	Media (1)	Media (2)	Media (dif)	DE (dif)	LI (95%)	p-valor
Al_i	Agrícola	Prístino	16	0,09	0,05	0,04	0,01	0,03	$p < 0,0001$
$Acidez_i$	Agrícola	Prístino	16	0,16	0,08	0,08	0,04	0,06	$p < 0,0001$

Adicionalmente, las variables Δ bases intercambiables, Δ CICE y Δ MOS mostraron diferencias significativas en el análisis de t apareada ($p < 0,0001$), lo cual significa que el efecto de la agricultura continua también causó un impacto en estas variables.

3.4.1. Análisis del Δ pH actual con las variables edáficas.

Para este estudio primeramente se realizó un análisis de correlación, el cual no mostró relación entre las variables en estudio ($p > 0,05$). Así mismo no se encontró regresión lineal entre el Δ pH actual con ninguna de las variables. Este resultado sugiere que el incremento de la acidez i y el Al_i como también la disminución de bases intercambiables no explicarían la disminución del pH actual a causa de la agricultura en forma lineal. Por otra parte, la única correlación positiva encontrada fue entre el incremento de la acidez i y el incremento de Al_i ($r = 0,66$; $p < 0,01$), aunque estas variables están asociadas metodológicamente.

3.4.2. Análisis del Δ pH potencial con las variables edáficas.

Con respecto al análisis del Δ pH potencial, se encontró regresión lineal negativa significativa ($p < 0,05$) con el Δ acidez i (Figura 3.7), también se determinó una correlación negativa significativa entre estas variables ($r = -0,51$; $p < 0,05$). Este resultado sugiere que el incremento de la acidez i explicaría la disminución del pH potencial en los suelos estudiados a causa de la agricultura.

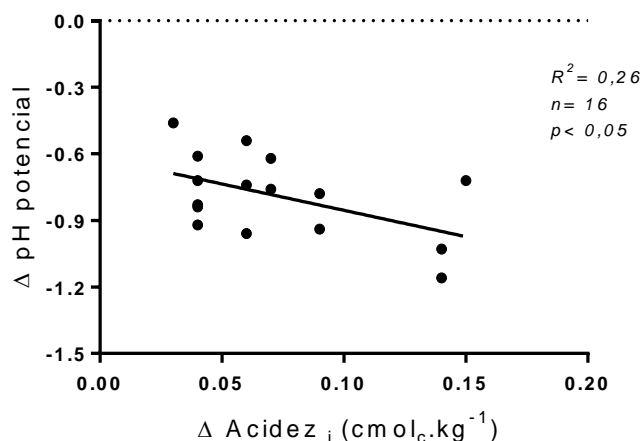


Figura 3.7. Relación lineal entre el ΔAcidez_i y el $\Delta \text{pH potencial}$ (0-20 cm) en los suelos estudiados de la Región Pampeana.

El Δacidez_i explicó en un 26% la variación del $\Delta \text{pH potencial}$. De acuerdo con el modelo resultante, por el incremento de 0,05 cmol_c.kg⁻¹ de acidez_i se esperaría una disminución de 0,74 unidades de pH potencial. El modelo de regresión resultante fue:

$$\Delta \text{pH potencial} = -2,37(\text{Acidez}_i) - 0,62$$

Este resultado propone que el incremento de la acidez_i influye en el potencial de acidificación de los suelos. Además, este resultado concuerda con Behera y Shukla (2015) quienes afirmaron que la acidificación es un proceso grave de degradación de las tierras agrícolas, que conduce a la disminución del pH y al incremento de la acidez_i . En el caso de 25 de Mayo (H1) se observó el mayor incremento de acidez_i con 0,15 cmol_c.kg⁻¹, sin embargo, no obtuvo la mayor disminución del pH potencial que fue de 0,72 unidades (Tabla 6), esto posiblemente debido a la variación del contenido de arcilla y MOS ya que los protones (H⁺) se encuentran retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas (Molina, 1998; Casierra y Aguilar, 2007).

El grupo de mayor disminución del pH potencial fue Arrecifes (A6) con una disminución de 1,16 y el incremento de acidez_i fue de 0,14 cmol_c.kg⁻¹. Adicionalmente, al analizar por separado la relación entre el $\Delta \text{pH potencial}$ y el Δacidez_i para cada uno

de los Grandes Grupos, se determinó que ésta solo mostró regresión lineal significativa ($p < 0,05$) en los suelos Argiudoles (Figura 3.8). Este resultado pone en evidencia que la potencialidad de acidez es mayor en los Argiudoles, lo cual podría ser explicado al mayor contenido de arcillas, que a su vez les permite tener mayores sitios de intercambio.

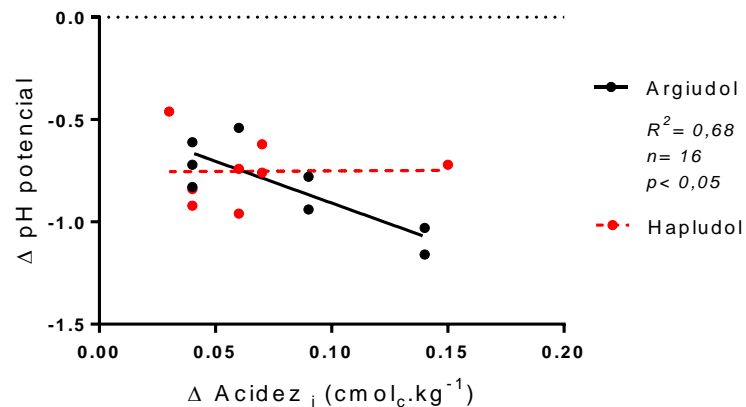


Figura 3.8. Relación lineal entre el Δ Acidez i y el Δ pH potencial (0-20 cm) en los Grandes Grupos de suelos estudiados de la Región Pampeana.

El modelo de regresión resultante fue:

$$\Delta pH p = -4,08(\Delta Acidez i) - 0,49$$

El Δ acidez i explicó en un 68% la variación del Δ pH potencial en los suelos Argiudoles. De acuerdo con el modelo resultante, por el incremento de $0,05 \text{ cmolc.kg}^{-1}$ de acidez i se esperaría una disminución de 0,69 unidades de pH potencial.

3.5. Resultados y discusión del objetivo específico 4: Evaluar la variación del pH actual y potencial en los suelos agrícolas y prístinos.

3.5.1. Variación del pH actual.

Para una mejor comprensión de la relación entre las variables estudiadas, se realizó un análisis de correlación de Pearson con la totalidad de las muestras ($n = 78$). En este análisis se encontró una correlación negativa altamente significativa entre el pH

actual, el Al_i y la acidez i ($r = -0,82$ y $-0,81$; $p < 0,0001$) respectivamente. También existió correlación positiva entre el pH actual con las bases intercambiables y la CICE, en ambas fue ($r = 0,83$; $p < 0,0001$), con la MOS ($r = 0,31$; $p < 0,01$) y con la precipitación ($r = -0,24$). No se encontró correlación entre el pH actual y el porcentaje de arena, limo y arena. Esto ratifica lo encontrado en el análisis de componentes principales (Figura 3.1).

De acuerdo con los resultados del análisis de correlación, se procedió a realizar análisis de regresión lineal con las variables anteriormente citadas siendo el pH actual la variable de respuesta.

3.5.1.1. Regresión lineal entre el pH actual y Al_i .

En este análisis se encontró regresión lineal altamente significativa ($p < 0,0001$) entre el pH actual y el Al_i . Adicionalmente se observó que los valores más elevados de Al_i se encontraron a un pH inferior a 5,5. Esto coincide con varios autores, quienes mencionaron que un pH inferior al indicado es una condición para la solubilización de este elemento (Fassbender, 1987; Sosa, 1994; Porta et al., 2003; Zapata, 2004; Casierra y Aguilar, 2007) y que a valores de $pH < 5,5$ el Al forma especies solubles (Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH_2)^+$), capaces de ser intercambiadas. Así mismo, Amiotti et al. (2000) afirmaron que la disminución del pH junto con una mayor producción de ácidos orgánicos de la MOS incrementa la hidrólisis ácida de silicatos, con liberación de aluminio.

Esta relación lineal mostró que el 68% de la variación del pH actual de los suelos, estuvo explicada por la variación del Al_i . El modelo de regresión resultante fue:

$$pH \text{ actual} = -17,1(Al \ i) + 7,2$$

Esta relación podría ser explicada por Lindsay (1979) quien afirmó que la actividad del Al_i en equilibrio con las diferentes formas presentes en el suelo decrece aproximadamente 1.000 veces por cada unidad de incremento en el valor de pH actual.

3.5.1.2. Regresión lineal entre el pH actual y la Acidez i .

Este análisis mostró una regresión lineal negativa altamente significativa ($p < 0,0001$) entre el pH actual y la acidez i (Figura 3.9). Este resultado confirma que el pH es la expresión de la acidez activa del suelo, es decir la cantidad de iones acidificantes (H^+) presentes en los sitios de intercambio del suelo (Espinosa y Molina, 1999; Zapata, 2004; Iturri, 2015).

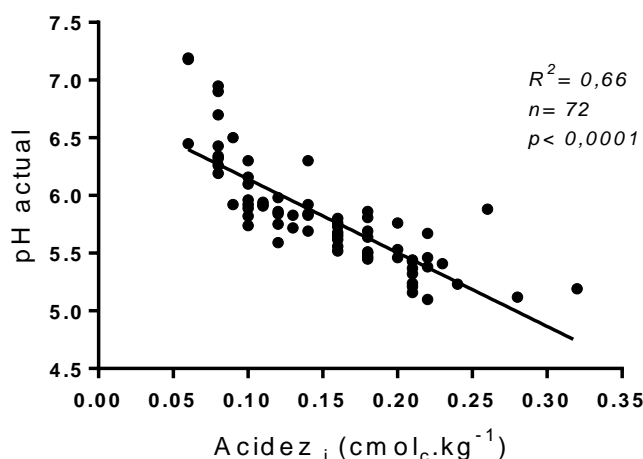


Figura 3.9. Relación entre pH actual y acidez intercambiable (0-20 cm) en suelos agrícolas estudiados de la Región Pampeana.

Esta relación mostró que el 66% de la variación del pH actual de los suelos estuvo explicada por la variación de la Acidez i . El modelo de regresión resultante fue:

$$pH \text{ actual} = -6,39(Acidez \ i) + 6,78$$

3.5.1.3. Regresión lineal entre el pH actual y la suma de bases i .

Esta relación mostró una regresión lineal positiva altamente significativa ($p < 0,0001$) entre la suma de bases intercambiables y el pH actual (Figura 3.10). Este resultado indica que a medida que incrementan las bases intercambiables también lo hace el pH actual, este resultado es concordante con otros autores en esta región (Cruzate y Casas, 2003; Gelati y Vásquez, 2004; Pilatti et al., 2008; García y Vásquez,

2011; Sainz Rozas et al., 2011; Vázquez, et al., 2012; Vázquez y Pagani, 2014; Eyherabide, 2016; Bennardi et al., 2018).

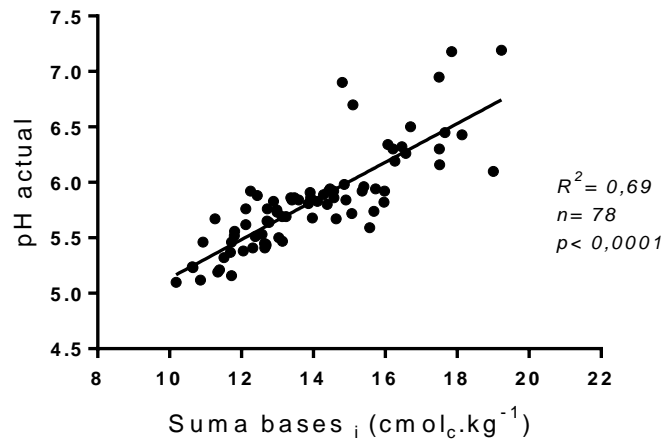


Figura 3.10. Relación entre la suma de bases intercambiables y el pH actual (0-20 cm) en suelos de la Región Pampeana.

La variación de las bases intercambiables explicó en un 69% la variación del pH actual, el modelo de regresión encontrado fue:

$$pH \text{ actual} = 0,17(\text{Bases } i) + 3,39$$

Entre las bases intercambiables se encontró que el Ca tuvo la mayor correlación positiva y altamente significativa con el pH actual ($r = 0,78$; $p < 0,0001$), esto concuerda con Heredia et al. (2003) y Esterlich et al. (2012) quienes mostraron una estrecha relación entre la reducción del pH actual y el Ca y Mg intercambiables.

Por lo anteriormente expuesto, se analizó la relación entre el Ca_i y el pH actual. Esta mostró una relación lineal positiva ($p < 0,0001$), que explicó en un 60% la variación del pH actual. El modelo de regresión resultante fue:

$$pH \text{ actual} = 0,23(Ca_i) + 3,49$$

Este resultado es concordante con Cruzate y Casas (2004) quienes determinaron que los suelos de la Región Pampeana han sufrido un descenso en los contenidos de Ca y Mg que se manifiesta en una disminución generalizada del pH. Adicionalmente, Díaz-Zorita et al. (2018) informaron que el incremento de la producción agrícola redujo el pH

y los niveles extractables de calcio. En esta tesis se determinó una disminución promedio entre suelos agrícolas y prístinos del 20,7% de Ca_i . Otros autores han reportado una reducción del 12% como consecuencia de la agricultura (Sainz Rozas et al., 2013) en la Región Pampeana.

3.5.1.4.Regresión lineal entre pH actual y CICE.

Esta relación mostró una respuesta similar a la de suma de bases intercambiables y el pH actual, que explicó en un 69% que la variación del pH actual se produjo por la variación de la CICE. Esta regresión lineal fue positiva y altamente significativa ($p < 0,0001$). El modelo de regresión resultante fue:

$$pH_{actual} = 0,18(CICE) + 3,32$$

El resultado de esta relación concuerda con Sadzawka (2006) y Oliva (2009) en suelos volcánicos de Chile y Honduras respectivamente, quienes indicaron que el descenso del pH afectó a las cargas variables de los coloides aumentando las cargas positivas en la superficie provocando una disminución de la CICE.

3.5.1.5.Regresión lineal entre pH actual y MOS.

Esta relación a pesar de mostrar una regresión lineal positiva ($p < 0,01$) entre la MOS y el pH actual, solo explicó en un 9% la variación del pH actual a causa de la MOS. El modelo estadístico resultante fue:

$$pH_{actual} = 0,89(MOS) + 11,7$$

Otros autores también encontraron relaciones significativas entre el pH y la MOS (Hevia et al., 2003; McCauley et al., 2017) en suelos semiáridos de Argentina y de Montana -Estados Unidos, respectivamente. La baja correlación ($r = 0,31$) hallada en esta tesis se debería a que los suelos pertenecen a diferentes ambientes y niveles de materia orgánica en sus horizontes superficiales. No obstante, Álvarez et al. (2019)

reportaron una correlación negativa entre el pH y el CO ($r = -0,46$) en los suelos de la región.

3.5.1.6. Regresión lineal entre el pH actual y la precipitación.

En esta relación a pesar de mostrar una regresión lineal negativa ($p < 0,05$) entre la precipitación y el pH actual, solo explicó en un 6% la variación del pH actual. Este resultado es concordante con Iturri (2015) quien afirmó que el clima es un factor que incide en los valores de pH de los suelos agrícolas de Argentina. El modelo estadístico resultante fue:

$$pH \text{ actual} = -0,0009(\text{precipitación}) + 6,94$$

No obstante, en esta tesis se encontró una mayor correlación negativa entre el pH y la precipitación a lo reportado por Álvarez et al. (2019) quienes encontraron una correlación entre el pH actual y la precipitación ($r = -0,14$) en esta región.

3.5.1.7. Análisis de regresión múltiple (pH actual).

En este análisis se determinó que las variables acidez i y bases intercambiables fueron las de mejor ajustaron y explicaron en un 74% la variación del pH actual, adicionalmente esta regresión fue altamente significativa ($p < 0,001$). En la Tabla 8 se muestran los coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la regresión lineal múltiple.

Tabla 8. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados. LI= límite inferior; LS= límite superior; VIF= factor de inflación de la varianza.

Coef	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	CpMallovs	VIF	p-valor
Const	4,79	3,98	5,59	11,86			< 0,0001
Acidez i	-3,08	-4,68	-1,48	-3,83	15,64	3,02	< 0,001
Bases i	0,11	0,06	0,15	5,03	26,30	3,02	< 0,0001

El modelo de la regresión múltiple resultante fue:

$$pH \text{ actual} = -3,08(\text{Acidez } i) + 0,11(\text{Bases } i) + 4,79$$

De acuerdo con el resultado de esta regresión lineal múltiple, se puede concluir que la disminución del pH actual se evidenció por la disminución de bases intercambiables y el incremento de la acidez i . Este resultado es concordante con los resultados mostrados en el biplot (Figura 3.1) del análisis de componentes principales, donde se encontró una relación negativa directa entre estas variables.

3.5.2. Variación del pH potencial.

El análisis de correlación de Pearson con la totalidad de las muestras ($n= 78$) mostró una correlación negativa altamente significativa entre el pH potencial, la acidez i y el Al_i ($r= -0,79$ y $-0,74$; $p < 0,0001$) respectivamente. Correlación positiva entre el pH potencial, las bases intercambiables y la CICE, en ambas fue ($r= 0,79$; $p < 0,0001$) y con la MOS ($r= 0,23$; $p < 0,05$). No se encontró correlación entre el pH potencial, la precipitación y el porcentaje de arena, limo y arena. A pesar de tener la misma tendencia, en todos los casos se observó que los coeficientes de correlación fueron menores en relación con los coeficientes del pH actual (punto 3.5.1). De acuerdo con estos resultados, se procedió a realizar análisis de regresión lineal con las variables anteriormente analizadas siendo el pH potencial la variable de respuesta.

3.5.2.1. Regresión lineal entre el pH potencial y las variables edáficas.

Como se mencionó en el punto anterior, se observó una tendencia similar de los coeficientes correlación en ambos pH (actual y potencial). Dada esta similitud, únicamente se mostrará el resultado de los coeficientes de regresión y el modelo estadístico resultante de cada regresión analizada (Tabla 9).

Tabla 9. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el pH actual. R²= coeficiente de determinación; EE= error experimental.

Variables	N	R ²	E.E.	Modelo estadístico	p-valor
Acidez _i	78	0,62	0,60	$y = -6,68x + 5,98$	< 0,0001
Al _i	78	0,54	1,73	$y = -16,4x + 6,31$	< 0,0001
Bases _i	78	0,62	0,02	$y = 0,18x + 2,51$	< 0,0001
CICE	78	0,62	0,02	$y = 0,18x + 2,48$	< 0,0001
MOS	78	0,05	0,07	$y = 0,15x + 4,58$	< 0,05

Los resultados mostrados en la Tabla 9 indican que la acidez_i, las bases intercambiables y la CICE son las variables que en mayor porcentaje explicaron la variación del pH potencial (62%); esto a diferencia del pH actual, donde las bases intercambiables fueron las que en mayor porcentaje (69%) explicaron la variación del mismo.

3.5.2.2. Análisis de regresión múltiple (pH potencial).

En este análisis de regresión lineal múltiple se determinó que las variables acidez_i y bases intercambiables fueron las de mejor ajustaron y explicaron en un 69% la variación del pH potencial, siendo esta regresión altamente significativa ($p < 0,001$). En la Tabla 3.10 se muestran los coeficientes de regresión y estadísticos asociados de la regresión lineal múltiple.

Tabla 10. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el pH potencial. LI= límite inferior; LS= límite superior; VIF= factor de inflación de la varianza.

Coef	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	CpMallows	VIF	p-valor
Const	4,17	3,21	5,12	8,72			< 0,0001
Acidez _i	-3,66	-5,56	-1,77	-3,85	15,81	3,02	< 0,001
Bases _i	0,10	0,05	0,15	3,87	15,99	3,02	< 0,001

El modelo de la regresión múltiple resultante fue:

$$pH \text{ potencial} = -3,66(\text{Acidez } i) + 0,10(\text{Bases } i) + 4,17$$

Los resultados obtenidos de regresión y correlación mostraron la misma tendencia en la variación del pH actual y potencial, este último con valores más bajos de los coeficientes de correlación y de determinación. A partir de este resultado, se aconseja el uso del pH actual para el análisis de la acidificación de los suelos, siendo este más sencillo de realizar.

3.6. Resultados y discusión del objetivo específico 5: Comparar si existen diferencias de comportamiento en la variación del pH actual y potencial entre los suelos Argiudoles y Hapludoles.

Con la finalidad de comparar el comportamiento en la variación del pH actual y potencial en ambos Grandes Grupos, se realizaron análisis de estadística descriptiva y de regresión lineal. Saber cómo es el comportamiento de estos suelos es de suma importancia ya que nos mostrará cuál de ellos sería el más susceptible a la acidificación dependiendo de la variable analizada.

3.6.1. Estadística descriptiva.

En la Tabla 11 se presentan las medidas de resumen de cada variable estudiada en ambos Grandes Grupos. En los Argiudoles se observó que los CV de las variables pH actual y potencial fueron bajos, los de las variables acidez H^+ (muy alto), Al_i (alto), MOS (alto) y % arena (muy alto) de acuerdo con Pimentel (1984). En los Hapludoles la variable con CV más elevado fue % limo (muy alto). En todas las variables los valores de las medias y medianas resultaron similares, indicando distribuciones poblacionales simétricas.

La variabilidad del pH actual fue notablemente menor al del resto de las variables en ambos Grandes Grupos, a pesar de que las muestras poseen una amplia distribución en la Región Pampeana. Esto es concordante con Cox et al. (2006) y Gregorini et al. (2016) quienes hallaron que las propiedades con menor variación son aquellas que son

intrínsecas de la génesis del suelo como lo es el pH del suelo. Los CV Al_i en ambos Grandes Grupos fueron menores en relación con los datos presentados por Millán et al. (2010) y Vázquez (2011) en suelos pampeanos.

Se podría afirmar que la mayoría de los suelos estudiados tienen una alta posibilidad de incrementar su contenido de Al_i , ya que el promedio de pH potencial en ambos Grandes Grupos está en un valor cercano a 5,0; condición para la solubilización de este elemento.

Tabla 11. Resumen de las medidas descriptivas de los suelos estudiados de la Región Pampeana. Min: Mínimo; Max: Máximo; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación (%).

Medidas de resumen estadístico (Argiudoles) n=40						
Variables	Media	Mediana	Min	Max	E.E.	CV
pH actual	5,79	5,79	5,12	7,18	0,07	7,64
pH potencial	4,91	4,97	4,12	6,13	0,08	10,1
Acidez i (cmol _c kg ⁻¹)	0,16	0,15	0,06	0,28	0,01	36,02
Al_i (cmol _c kg ⁻¹)	0,08	0,08	0,05	0,16	<0,01	29,51
Suma de bases (cmol _c kg ⁻¹)	13,93	13,5	10,63	19	0,36	15,91
CICE (cmol _c kg ⁻¹)	14,01	13,58	10,75	19,05	0,36	15,68
MOS (%)	3,05	3,07	1,59	5,23	0,12	23,68
Arcilla (%)	24,18	22	12	35	1,01	25,7
Limo (%)	51,55	52	23,3	70	1,79	21,41
Arena (%)	24,27	20	10	52,9	2,02	51,28
Precipitación (mm/año)	1308,13	1334,88	951,85	1445,83	17,16	8,09
Medidas de resumen estadístico (Hapludoles) n=40						
Variables	Media	Mediana	Min	Max	E.E.	CV
pH actual	5,86	5,83	5,1	7,19	0,07	7,7
pH potencial	5,05	5,05	4,19	6,24	0,07	9,01
Acidez i (cmol _c kg ⁻¹)	0,14	0,14	0,06	0,32	0,01	39,59
Al_i (cmol _c kg ⁻¹)	0,08	0,08	0,05	0,12	<0,01	22,46
Suma de bases (cmol _c kg ⁻¹)	13,97	13,69	10,18	19,23	0,32	14,7
CICE (cmol _c kg ⁻¹)	14,05	13,77	10,28	19,28	0,32	14,52
MOS (%)	2,21	2,17	1,3	3,17	0,07	19,21
Arcilla (%)	18,51	18	10	28	0,61	20,88
Limo (%)	29,73	28	8	52	1,91	40,73
Arena (%)	51,76	53,5	24	75	2,26	27,65
Precipitación (mm/año)	1185,59	1219,26	951,11	1292,95	16,49	8,80

Leyenda: se incluyen suelos prístinos y agrícolas. El valor para la precipitación es el promedio anual entre los años 2015-2017 (Huffman et al., 2007).

3.6.2. Variación del pH actual en los Grandes Grupos.

3.6.2.1. Regresión lineal entre el Al_i y el pH actual.

El análisis entre estas variables mostró una regresión lineal negativa altamente significativa ($p < 0,0001$) en ambos Grandes Grupos. Sin embargo, el coeficiente de determinación más elevado lo tuvieron los Hapludoles (Figura 3.11). Igual tendencia mostraron los coeficientes de correlación ($r = -0,83$ y $-0,85$; $p < 0,0001$) Argiudoles y Hapludoles respectivamente. Los modelos de regresión para cada uno de los Grandes Grupos fueron:

$$pH_{actual} = -14,8(Al_i) + 7,03 \text{ (Argiudoles)}$$

$$pH_{actual} = -21,9(Al_i) + 7,56 \text{ (Hapludoles)}$$

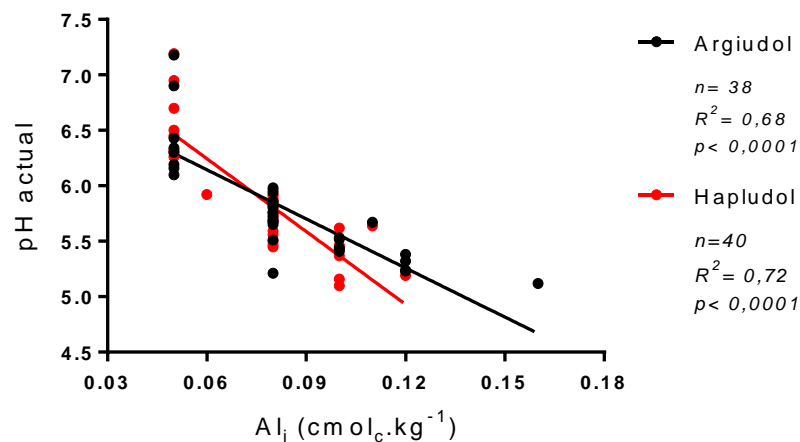


Figura 3.11. Relación entre el Al_i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.

Los modelos de regresión no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los Grandes Grupos, esto a pesar de que gráficamente la pendiente de los Hapludoles se aprecia más pronunciada. Sin embargo, esto podría poner en evidencia que los Hapludoles son suelos con mayor vulnerabilidad al descenso del pH con la presencia de Al_i . Lo anteriormente expuesto podría ser explicado por las propiedades fisicoquímicas

del suelo ya que de estas depende la magnitud de los efectos del Al_i (Barceló y Poschenrieder, 2002; Casierra y Aguilar, 2007; Iturri, 2015). En el caso de los Hapludoles, esta relación explicó en un 72% que la variación del pH actual se produjo por la variación del Al_i .

En promedio, el contenido de Al_i en los Argiudoles bajo agricultura fue de $0,09 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ y en los Hapludoles $0,08 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$; estos valores se asemejan a los reportados por otros autores en la región, Millán et al. (2010) y Vázquez et al. (2011) quienes reportaron valores máximos de $0,07 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ en Argiudoles y $0,12 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ en Hapludoles. Además, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el incremento de Al_i respecto a la media de los prístinos entre los Grandes Grupos de suelo.

3.6.2.2. Regresión lineal entre Acidez i y el pH actual.

El análisis entre estas variables mostró regresión lineal negativa altamente significativa ($p < 0,0001$) en ambos Grandes Grupos. A diferencia de la relación anterior, el coeficiente de determinación más elevado lo tuvieron los Argiudoles (Figura 3.12). Igual tendencia mostraron los coeficientes de correlación ($r = -0,86$ y $-0,76$; $p < 0,0001$) Argiudoles y Hapludoles respectivamente. Los modelos de regresión para cada uno de los Grandes Grupos fueron:

$$pH \text{ actual} = -6,79(Acidez \ i) + 6,85 \text{ (Argiudoles)}$$

$$pH \text{ actual} = -6,02(Acidez \ i) + 6,72 \text{ (Hapludoles)}$$

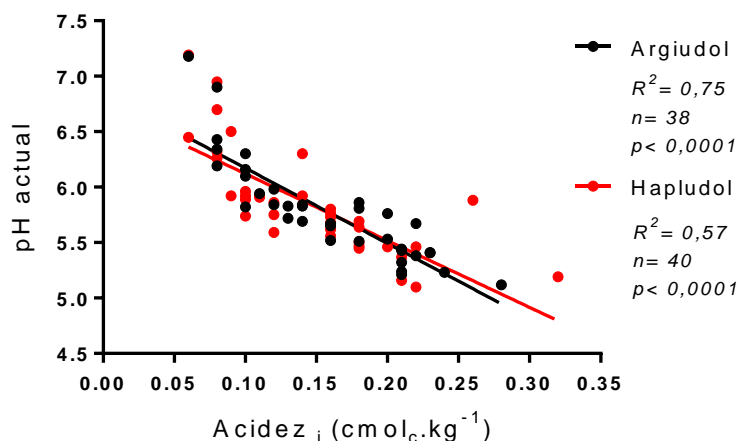


Figura 3.12. Relación entre la Acidez i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.

Los modelos de regresión mostraron una tendencia similar en ambos Grandes Grupos, es decir, a un mismo valor de acidez i la respuesta en ambos Grandes Grupos sería un valor de pH actual muy semejante. Esto a pesar de que el coeficiente de determinación mostró que la variación del pH actual estuvo explicada por la acidez i en un 75% en los Argiudoles, sugiriendo que la acidez i tendría mayor efecto en la variación del pH actual en los Argiudoles.

Este resultado es concordante con Álvarez et al. (2019) quienes encontraron correlación negativa entre el pH actual y la acidez i en suelos pampeanos y con Oliva (2009) en suelos volcánicos de Honduras.

En promedio el contenido de acidez i fue de 0,17 cmol_c.kg⁻¹ en los Argiudoles y 0,15 cmol_c.kg⁻¹ en los Hapludoles. El valor más alto se encontró en el grupo 25 de Mayo (H1) con un valor de 0,24 cmol_c.kg⁻¹. Se determinó un incremento promedio de acidez i de 0,08 y 0,07 cmol_c.kg⁻¹ en Argiudoles y Hapludoles respectivamente, respecto de los prístinos. Sin embargo, no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) en el incremento de acidez i entre los Grandes Grupos de suelo.

3.6.2.3. Regresión lineal entre la suma bases y el pH actual.

El análisis entre estas variables mostró una regresión lineal positiva altamente significativa ($p < 0,0001$) en ambos Grandes Grupos. El coeficiente de determinación más elevado lo tuvieron los Hapludoles (Figura 3.13). Igual tendencia mostraron los coeficientes de correlación ($r = 0,81$ y $0,86$; $p < 0,0001$) Argiudoles y Hapludoles respectivamente. Los modelos de regresión para cada uno de los Grandes Grupos fueron:

$$pH \text{ actual} = 0,16(Bases \text{ i}) + 3,54 \text{ (Argiudoles)}$$

$$pH \text{ actual} = 0,19(Bases \text{ i}) + 3,23 \text{ (Hapludoles)}$$

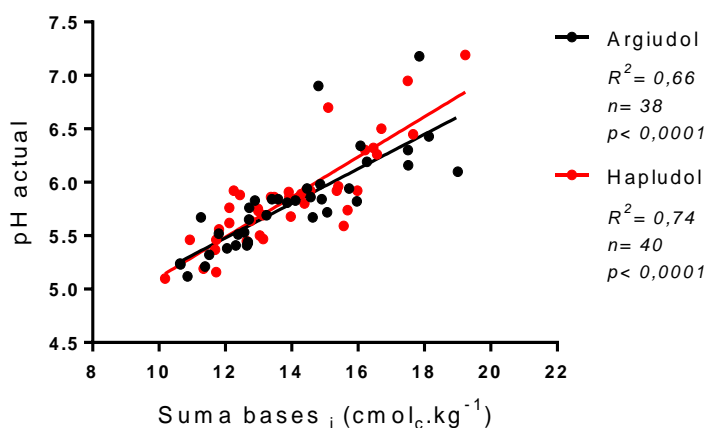


Figura 3.13. Relación entre la suma de bases i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.

Los modelos de regresión mostraron una tendencia similar en ambos Grandes Grupos, es decir, a un mismo valor de bases intercambiables la respuesta en ambos Grandes Grupos sería un valor de pH actual muy semejante. Con este resultado se puede afirmar que, a un valor bajo de pH actual menor es la suma de bases en ambos Grandes Grupos. Sin embargo, y de acuerdo con el coeficiente de correlación ($R^2 = 74$) esta relación fue mayormente explicada en los Hapludoles, lo que podría evidenciar que

estos suelos son más susceptibles a la disminución del pH actual por la disminución de las bases intercambiables.

3.6.2.4.Regresión lineal entre la CICE y el pH actual.

El análisis entre estas variables mostró similar tendencia a la relación anterior, resultando una regresión lineal positiva altamente significativa ($p < 0,0001$) en ambos Grandes Grupos. Así mismo, el coeficiente de determinación más elevado lo tuvieron los Hapludoles ($R^2 = 0,75$). Igual tendencia mostraron los coeficientes de correlación ($r = 0,81$ y $0,86$; $p < 0,0001$) en Argiudoles y Hapludoles respectivamente. Los modelos de regresión para cada uno de los Grandes Grupos fueron:

$$pH \text{ actual} = 0,16(CICE) + 3,51 \text{ (Argiudoles)}$$

$$pH \text{ actual} = 0,19(CICE) + 3,2 \text{ (Hapludoles)}$$

En los Hapludoles, esta relación explicó en un 75% que la variación del pH actual se encuentra explicado por la CICE y en los Argiudoles el 65%. Este resultado es concordante con Millán et al. (2010) y Vázquez (2010) quienes encontraron una correlación positiva entre el pH actual y la CICE ($r = 0,71$) en los Grandes Grupos de suelos de la región.

3.6.2.5.Regresión lineal entre la MOS y el pH actual.

El análisis entre estas variables una mostró regresión lineal positiva significativa ($p < 0,05$) en ambos Grandes Grupos. El coeficiente de determinación más elevado lo tuvieron los Argiudoles (Figura 3.14). Igual tendencia mostraron los coeficientes de correlación ($r = 0,81$ y $0,86$; $p < 0,0001$) en Argiudoles y Hapludoles respectivamente. Los modelos de regresión para cada uno de los Grandes Grupos fueron:

$$pH \text{ actual} = 0,30(MOS) + 4,9 \text{ (Argiudoles)}$$

$$pH \text{ actual} = 0,41(MOS) + 4,94 \text{ (Hapludoles)}$$

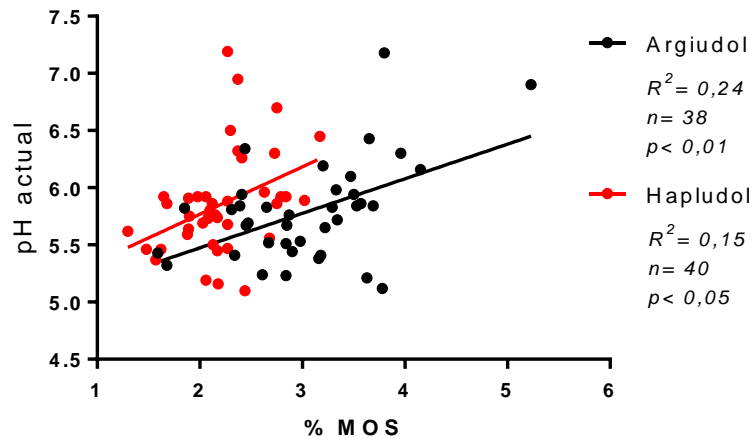


Figura 3.14. Relación entre la MOS y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.

Los modelos de regresión mostraron diferencias significativas ($p < 0,01$) entre los Grandes Grupos, es decir, a un mismo valor de pH actual la respuesta en ambos Grandes Grupos sería un valor de MOS diferente. Esta diferencia significativa en las pendientes fue determinada con el uso de las variables auxiliares dummy y pone en evidencia la capacidad reguladora de la MOS. En la Figura 3.14 se observa que los Hapludoles poseen niveles más elevados de pH a un mismo valor de MOS con respecto a los Argiudoles.

3.6.3. Variación del pH potencial en los Grandes Grupos.

Los análisis realizados para conocer las diferencias en el comportamiento de la variación del pH potencial mostraron similar tendencia en comparación con los análisis realizados para el pH actual, también se observó que los coeficientes de correlación fueron menores en relación con los del pH actual, excepto para la acidez i en los Argiudoles. En la Tabla 12 se muestran los coeficientes de regresión y estadísticos asociados para las variables en estudio siendo el pH potencial la variable de respuesta.

3.6.3.1. Regresión lineal entre la Acidez i y el pH potencial.

El análisis entre estas variables mostró regresión lineal negativa altamente significativa ($p < 0,0001$) en ambos Grandes Grupos. A diferencia de la relación anterior, el coeficiente de determinación más elevado lo tuvieron los Argiudoles (Figura 3.13). Igual tendencia mostraron los coeficientes de correlación ($r = -0,87$ y $-0,70$; $p < 0,0001$) Argiudoles y Hapludoles respectivamente. Los modelos de regresión para cada uno de los Grandes Grupos fueron:

$$pH \text{ potencial} = -7,69(Acidez \text{ i}) + 6,11 \text{ (Argiudoles)}$$

$$pH \text{ potencial} = -5,63(Acidez \text{ i}) + 5,86 \text{ (Hapludoles)}$$

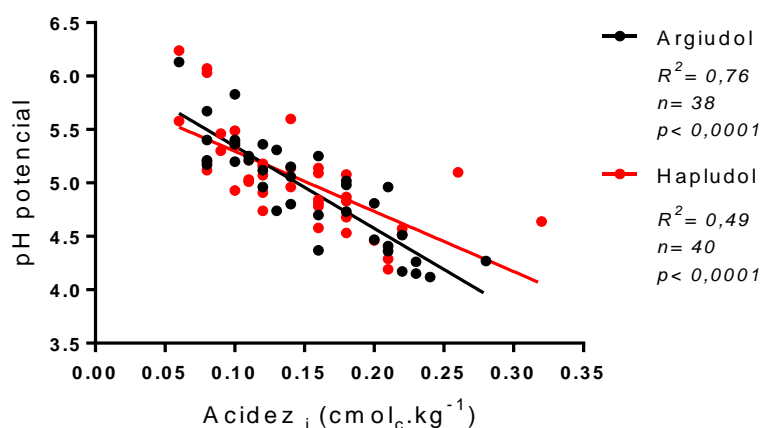


Figura 3.15. Relación entre la Acidez i y el pH actual entre los Grandes Grupos de suelos de la Región Pampeana.

Los modelos de regresión mostraron que los Argiudoles tendrían mayor descenso del pH potencial a un mismo valor de acidez i. Esto pone en evidencia que los Argiudoles son suelos más propensos al descenso del pH potencial al incrementar su acidez i ya que esta relación estuvo explicada en un 76%. Este resultado destaca que la potencialidad de acidez es mayor en los Argiudoles y podría ser explicado por su mayor contenido de arcillas lo cual incrementa los sitios de intercambio con respecto a los Hapludoles. Así mismo, este resultado es concordante con la relación del Δ pH potencial la cual estuvo explicada en un 26% por el Δ acidez i (punto 3.4.2).

3.6.3.2. Regresión lineal entre pH potencial y las variables edáficas.

Como se mencionó en el punto 3.6.3, se observó una tendencia similar de los coeficientes correlación en los Grandes Grupos entre ambos pH (actual y potencial). Dada esta similitud, únicamente se mostrarán los resultados de los coeficientes de regresión y el modelo estadístico resultante de cada regresión analizada (Tabla 12).

Tabla 12. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el pH potencial. $R^2 =$

Variables Argiudoles	N	R²	Modelo estadístico	p-valor
Al _i	38	0,56	$y = -15,04x + 6,18$	$< 0,0001$
Bases _i	38	0,61	$y = 0,17x + 2,48$	$< 0,0001$
CICE	38	0,60	$y = 0,18x + 2,45$	$< 0,0001$
MOS	38	0,15	$y = 0,27x + 4,10$	$< 0,05$
Variables Hapludoles	N	R²	Modelo estadístico	p-valor
Al _i	40	0,52	$y = -18,73x + 6,51$	$< 0,0001$
Bases _i	40	0,67	$y = 0,18x + 2,53$	$< 0,0001$
CICE	40	0,67	$y = 0,18x + 2,50$	$< 0,0001$
MOS	40	0,18	$y = 0,45x + 4,04$	$< 0,01$

coeficiente de determinación.

Los resultados mostrados en la Tabla anterior indicaron que las bases intercambiables explicaron en mayor porcentaje la variación del pH potencial (61 y 67%) Argiudoles y Hapludoles respectivamente, lo que concuerda con los resultados mostrados en el biplot (Figura 3.1). La diferencia en el comportamiento de la variación del pH potencial entre los Grandes Grupos estuvo en el incremento de la acidez_i en los Argiudoles, existiendo evidencia estadística suficiente para concluir que los Argiudoles son los suelos con mayor potencial de acidificación. Esto también coincidió con la disminución promedio de del pH potencial -0,82 y -0,75 Argiudoles y Hapludoles respectivamente.

4. CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se cumplieron con todos los objetivos propuestos, de acuerdo con el objetivo general, se cuantificó la relación entre la acidificación de suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos con al menos 25 años de uso agrícola y la presencia de aluminio.

4.1. Conclusiones para el objetivo específico 1.

- Se encontró que los valores de Al_i en los suelos agrícolas estuvieron por encima del valor de los suelos prístinos, por tal razón se acepta la **hipótesis general** ya que se determinó que la actividad agrícola continua produjo un aumento del Al_i , evidenciado en la relación negativa entre las bases intercambiables y el Al_i .
- Así mismo, en la relación ΔAl_i se observó un incremento significativo del Al_i lo cual sugiere que el impacto de la agricultura provocó este incremento.
- Se acepta la **hipótesis 2**, debido a la regresión lineal altamente significativa ($p < 0,0001$) entre el pH actual y el Al_i la cual mostró que el 68% de la variación del pH actual, estuvo explicada por la variación del Al_i . Además, existió correlación positiva entre el incremento de la acidez i y el Al_i ($r = 0,66$; $p < 0,01$).
- Los valores analizados de Al_i en los suelos agrícolas se encuentran muy por debajo de los umbrales de toxicidad reportados por la literatura científica consultada.

4.2. Conclusiones para el objetivo específico 2.

- Se concluye que la agricultura continua provocó un descenso del pH edáfico con lo cual se acepta la **hipótesis 1** ya que mediante el análisis de t apareada

se determinó una disminución en promedio de 0,81 unidades de pH actual que representó el 12,4% de disminución respecto a los suelos prístinos.

- El pH potencial de los suelos estudiados demostró la potencialidad de acidificación de estos, ya que el valor medio del pH potencial fue de 4,92 con una diferencia con respecto a los suelos prístinos de -0,79 unidades de pH.
- El incremento de la acidez i explicaría la disminución del pH potencial en los suelos estudiados.
- Se encontró un aumento de la acidez i en los suelos agrícolas que varió de 0,09 a 0,32 $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$.

4.3. Conclusiones para el objetivo específico 3.

- A pesar de no existir relación lineal entre las variables edáficas y el pH, se concluye que el descenso del pH edáfico fue causado por el incremento de la acidez y el aluminio intercambiable como también por la disminución de las bases intercambiables producto de la actividad agrícola. Esto se evidenció mediante el análisis de t apareada entre la diferencia de los suelos agrícolas y prístinos. Por tal motivo se acepta la **hipótesis 3**.
- A causa de la agricultura y mediante el análisis de regresión lineal no se pudo demostrar que el incremento de la acidez i y el Al_i como la disminución de las bases intercambiables expliquen la disminución del pH actual en los suelos estudiados, pero si con la relación lineal negativa y significativa entre el Δ acidez i y Δ pH potencial ($R^2=26\%$; $p<0.05$).

4.4. Conclusiones para el objetivo específico 4.

- Se concluye que las variables acidez i y bases intercambiables fueron las que mejor explicaron la variación del pH actual, debido a que fueron las que mejor

ajustaron en el modelo de regresión múltiple explicando un 74% la variación del pH actual.

- La acidez i , las bases intercambiables y la CICE fueron las variables que en un 62% explicaron la variación del pH potencial.
- Mediante el modelo de regresión se encontró que el 68% de la variación del pH actual de los suelos estudiados estuvo explicada por la variación del Al_i , que la misma fue altamente significativa ($p < 0,0001$), siendo únicamente superada por la relación entre el pH actual y bases intercambiables la cual estuvo explicada en un 69%. Con este resultado se concluye que el Al_i es una variable importante para tener en cuenta en la variación del pH actual.

4.5. Conclusiones para el objetivo específico 5.

- De acuerdo con los resultados obtenidos se acepta la **hipótesis 4**, ya que se evidenciaron diferencias de comportamiento entre los suelos Hapludoles y Argiudoles estudiados.
- La única relación que mostró diferencias significativas ($p < 0,01$) entre los Grandes Grupos determinada por las variables dummy fue entre el pH actual y la MOS, la cual pone en evidencia la capacidad reguladora de la MOS ya que los Hapludoles poseen niveles más elevados de pH a un mismo valor de MOS con respecto a los Argiudoles.
- La variación del pH actual estuvo explicada por la acidez i en un 75% en los Argiudoles, con lo cual la acidez i tendría mayor efecto en la variación del pH actual en los Argiudoles.
- La relación entre Δ pH potencial y el Δ acidez i solo mostró regresión lineal significativa ($p < 0,05$) en los suelos Argiudoles.

- Los coeficientes de determinación evidenciaron que los Hapludoles son los suelos con mayor susceptibilidad al descenso del pH actual debido a la disminución de bases intercambiables.
- Los Argiudoles son los suelos con mayor potencial de acidificación. Esto también coincidió con la disminución promedio del pH potencial -0,82 y -0,75 Argiudoles y Hapludoles respectivamente.

4.6. Conclusiones generales.

- El análisis del ACP mostró que los suelos estudiados presentaron diferentes valores de pH dados por su diferente uso, pudiéndose observar gráficamente como los suelos prístinos se separaron de los agrícolas.
- Se encontró correlaciones negativas y altamente significativas entre el pH con la acidez y el aluminio intercambiable, y positivas con las bases intercambiables, la CICE y la MOS. No se encontró correlación entre el pH y el tamaño de partícula.
- Las variables Δ bases intercambiables, Δ CICE y Δ MOS mostraron diferencias significativas respecto a los prístinos en el análisis de t apareada ($p < 0,0001$), este resultado sugiere que el efecto de la agricultura continua también causó un impacto en estas variables.
- Se observó que a medida que disminuyen las bases intercambiables, incrementa la acidez y el aluminio intercambiable en el suelo. Con este resultado se concluye que el contenido de bases intercambiables influye en la variación la de acidez i .

4.6. Consideraciones finales.

- Sería importante a futuro realizar estudios más profundos sobre este tema dirigiendo la zona de estudio sobre esta temática y sobre la posibilidad de realizar ensayos de corrección de estos suelos acidificados. Seguir trabajando en este tema ya que hay una variedad importante de suelos bajo agricultura intensiva con valores bajos de pH que habría que seguir monitoreando para evitar problemas mayores a futuro.
- A pesar de no haber encontrado niveles tóxicos de Al_i en los suelos estudiados, es importante seguir en la evaluación de esta variable ya que a futuro puede incrementarse en suelos con actividad agrícola continua de la región.
- Cabe destacar la originalidad de la presente investigación radica en dos aspectos fundamentales, el primero es que en la actualidad no hay publicaciones en la Región Pampeana donde se analice la magnitud del uso agrícola mediante la diferencia entre suelos prístinos y agrícolas y su relación con las diferentes variables edáficas. El segundo aspecto sería que el método utilizado para la determinación del aluminio y la acidez intercambiable no ha sido empleado anteriormente en otras investigaciones realizadas en la Región Pampeana.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, C.H., Muraoka, T., Lavorante, A.F. 2003. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. *Scientia Agricola*, v.60, n.2: 337-343.
- Adams, M. 1995. Fundamentos de química de suelos. Universidad Central de Venezuela. Ed. Arauco. 390 p.
- Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Management*. 17:62-66.
- Álvarez, C.R., Taboada M.A., Gutiérrez, F.H., Bono, A., Fernández, P.L., Pristupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- Álvarez, R. 2011. Cambios en los flujos de carbono y nitrógeno de los agrosistemas de la Pampa Ondulada producidos por la incorporación de soja en la rotación. Editorial Facultad de Agronomía-UBA. En: Soja, Correa et al. (eds.): 11-16.
- Álvarez, R., Berhongaray, G., De Paepe, J., Mendoza, M., Steinbach, H., Caride, C., Cantet, R. 2012. Productividad, fertilidad y secuestro de carbono en suelos pampeanos: efecto del uso agrícola. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Tomo LXVI, Buenos Aires. Argentina. 381-426.
- Álvarez, R., Giménez, A., Paganini, F., Recondo, V., Gangi, D., Caffaro, M., De Paepe, J., Berhongaray, G. 2018. Los árboles, no la agricultura, acidificaron los suelos pampeanos. XXVI Congreso Argentino de la Ciencias del Suelo. 22-27 p.
- Álvarez, R., Giménez, A., Paganini, F., Recondo, V., Gangi, D., Caffaro, M., De Paepe, J., Berhongaray, G. 2019. Soil acidity in the Argentine Pampas: effects of land use and management. *Soil & tillage research*. Science Direct. 10p. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104434>.
- Azcarate, P., Kloster, N. 2010. Comparación de métodos para la determinación de CIC: Acetato de amonio y Cloruro de amonio. INTA. Anguil. 5 p.
- Balsa, J. 2001. Las formas de producción predominantes en la agricultura pampeana al final de la primera expansión agrícola (1937). ¿Una vía "argentina" de desarrollo del capitalismo en el agro? *Mundo Agrario*, vol. 2, n° 3. 26 p.
- Baquy, M.A., Li, J., Xu, C., Mehmood, K., Xu, R. 2017. Determination of critical pH and Al concentration of acidic Ultisols for wheat and canola crops. *Solid Earth*, 8, 149–159.
- Baquy, M.A., Li, J., Shi, R. 2018. Higher cation exchange capacity determined lower critical soil pH and higher Al concentration for soybean. *Environ Sci Pollut Res* 25: 6980.
- Barak, P., Jobe, A.R., Krueger, L.A., Peterson, D.A. 1997. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. *Plant Soil*, 197(1): 61–96.

- Barceló, J., Poschenrieder, C. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxication as clues to the mechanisms of aluminum toxicity and resistance: A review. *Environmental & Experimental Botany*, 48(1): 75-92.
- Behera, S.K., Shukla, A. K. 2015. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India, *Land Degrad. Dev.*, 26: 71–79.
- Bennardi, D., Díaz, A., Juan, L., Millán, G., Pellegrini, A., Vázquez, M. 2018. Evaluación de la capacidad buffer en suelos ácidos de la Región Pampeana. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Cienc. Suelo (Argentina)* 36 (1): 30-38.
- Blake, L., Goulding, K.W.T., Mott, C.J.B., Johnston, A.E. 1999. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station, UK. *Eur. J. Soil Sci.*, 50 (3): 401–412.
- Bloem, A.A. 2002. Relationship between acid saturation and hydrogen activity of soils from different districts in South Africa, *South African Journal of Plant and Soil*, 19:2, 89-92.
- Bloom, P., Skyliberg, R., Ni, U.L., Sumner, F. 2005. Soil acidity. In: *Chemical Processes in Soils. SSSA Book Series 8*. M. A. Tabaiabai. and D. L. Sparks (eds.). SSSA. Madison. WI. 411-460.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L., O Connor, G.A. 1993. *Química de Suelos*. Ed. Limusa. Cap.5: 155-173.
- Bolan, N., Adriano, D.C., Curtin, D. 2003. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Adv. Agron.* 78, 215–272.
- Bouyoucos, G. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.*, vol. 54. Soc. of Agron., Inc., Madison, USA. 464-465.
- Brautigan, D.J. 2012. Aluminium speciation and phytotoxicity in alkaline soils *Plant Soil*, 360: 187-196.
- Bulanova, N., Synzynys, B., Kozmin, G. 2004. Aluminum induces chromosome aberrations in cells of wheat root meristem. *Genet* (37): 1455-1458.
- Burt, R. 2014. *Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0*. 5th ed. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2014. pp. 276-279.
- Buschiazzo, D.E., Hevia, G., Urioste, A., Hepper, E. 2000. Cultivation effects on phosphate forms and sorption in loess – soils of Argentina. *SoilSci.* 165, 427–436.
- Carrizo, M.E. 2007. Reacción del suelo (pH) y complejo intercambiable en Argiúdoles del centro de Santa Fe. *Prospección regional y cambios a la adición de carbonato de*

- calcio. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Litoral. Esperanza (Santa Fe). 69 p.
- Casierra, P.F., Aguilar, A.O. 2007. Estrés por Aluminio en Plantas: Reacciones en el Suelo, Síntomas en Vegetales y Posibilidades de Corrección. Una Revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*: 1 (2): 246-257.
- Chien, S., Gearhart, M., Collame, C. 2001. Efecto de diferentes fuentes de N amoniacal sobre la acidificación del suelo. Reporte de International Fertilizer Development Center.
- Conti, M.E., Guiffre L. 2014. Reacción del Suelo, Edafología, Bases y Aplicaciones Ambientales Argentinas. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires- Argentina. 298-304.
- Coscione, A., Andrade, J., Rajj, B. 1998. Revisiting titration procedures for the determination of exchangeable acidity and exchangeable aluminum in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.29. 1973-1982.
- Cox, MS., Gerard, P., Abshire, M. 2006. Selected soil properties' variability and their relationships with yield in three Mississippi fields. *Soil Sci* 171: 541-551.
- Cruzate, G., Casas, R. 2003. Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones agronómicas*. 44: 21-26
- Cruzate, G., Casas, R. 2004. Balance de nutrientes. Fertilizar. Sostenibilidad. Argentina Special Publication, N°. 8.
- Cruzate, G., Casas, R. 2012. Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* N°6: 7-14.
- Darusman, L.R., Stone, D.A., Whitney, K.A., Long, J.H. 1991. Soil properties after twenty years of fertilization with different nitrogen sources. *Soil science society of America journal*. 55:1097-1100.
- Díaz-Zorita, M., Poggio, S., Peper, L., Alberto M. 2018. Cambios en un Argiudol al implementar sistemas agrícolas intensificados. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 486-490 p.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablida, M., Robledo, C. 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Divito, G., Sainz Rozas, H., Echeverría, HE., Studdert, G., Wyngaard, N. 2011. Long term nitrogen fertilization: soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no tillage. *Soil Tillage Res*. 114(2): 117-126.
- Durán, A., Morrás, H., Studdert, G., Xiaobing, L. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America, *Chin. Geogra. Sci* 21(5).

- Drábek, O., Mládková, L., Borůvka, L., Szakova, J., Nikodem, A., Nemecek, K. 2005. Comparison of water-soluble and exchangeable forms of Al in acid forest soils. *Journal of inorganic biochemistry*. 99:1788-1795.
- Espinosa, J., Molina, E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. Primera edición. International Plant Nutrition Institute. p 1-4.
- Eyherabide, M. 2016. Región Pampeana: suelos más ácidos y con menos micronutrientes. INTA informa. 27 junio 2016. INTA – Balcarce. Argentina. 2 p.
- Fabrizzi, K.P., Picone, L., Berardo, A., García, F.O. 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en las propiedades químicas de un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo* 16: 71-76.
- Fassbender, H.W. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2ª ed. IICA, San José de Costa Rica. 163 p.
- Fassbender, H.W. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San Jose, Costa Rica. 1ra. Edición. Talleres gráficos de Trejos Hnos. Sucs., S.A. 173 -183.
- Fernandez, I.J., Rustad, J.E., Norton, S.A., Kahl, J.S., Cosby, B.J. 2003. Experimental Acidification Causes Soil Base-Cation Depletion at the Bear Brook Watershed in Maine. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1909-1919.
- Frossard, E., Condon, L., Oberson, A., Sinaj, S., Fardeau, J. 2000. Processes governing phosphorus availability in temperate soils. *J. Environ. Qual.* 29(1): 15-23.
- Gandois, L.; Perrin, A.S.; Probst, A. 2011. Impact of nitrogenous fertiliser-induced proton release on cultivated soils with contrasting carbonate contents: A column experiment. *Geochimica et cosmochimica acta*. 75:1185-1198.
- García M.G., Vázquez, M.E. 2011. Valoración económico-ecológica de la pérdida de nutrientes básicos de los suelos santafesinos. *Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica (Revibec)* 19: 29-41.
- Gelati, P., Vázquez, M. 2004. Exportación agrícola de nutrientes básicos en la zona N de la provincia de Buenos Aires y el costo de su remediación. *Acta Segundas Jornadas de la Asoc. Argentino Uruguay de Economía Ecológica (ASAUEE)*. 28-29.
- Gelati, P., Vázquez, M. 2008. Extracción agrícola de bases en el N de la provincia de Buenos Aires: costo de su remediación e implicancias económicas. *Revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica (Rebivec)* 7: 117-129.
- Goulding, K.W.T. 2016. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*. 32: 390–399.
- Gregorini, F., Ciarlo, E., Muschietti, P. Giuffré, L. 2016. Variabilidad espacial a escala de lote de suelos bajo distinto uso en la pampa arenosa. Resumen publicado en

- Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Río Cuarto, Córdoba, 1ra edición. ISBN 978-987-688-170-8. junio 2016.
- Guo, J., Liu, X., Zhang, Y., Shen, J., Han, W., Zhang, W., Christie, P., Goulding, K., Vitousek, P., Zhang, F. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands, *Science*, 327, 1008–1010.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., Nelson, W.L. 2005. Soil acidity and alkalinity. En: J.L. Havlin, J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson (ed.) *Soil fertility and fertilizers*. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 7th ed. 45-96.
- Heredia, O., Arrigo, N., Romano, R. 1997. Encalado, su efecto sobre las propiedades físico- químicas de un Argiudol. *Rev. Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina*. 17 (3): 263-268.
- Heredia, O., Duffau, V., Conti, M. 2003. Cambios de la fertilidad edáfica en los suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Informaciones agronómicas del Cono Sur*, N°19. Buenos Aires, Argentina. 3 p.
- Hevia, G., Buschiazzi, D., Hepper, E., Urioste, A., Antón, E. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma*. 116:265-277.
- Hollier, C., Reed, M. 2005. Acid soils. Victorian Government Agriculture. Rutherglen. Note Number: AG1182: 1-5.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Stocker, E.F. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1): 38-55.
- Ikiriko, M., Omueti, J., Thomas. E. 2016. Examination of Percentage Aluminum Saturation as a Criterion for Liming Tropical Acid Soils of Nigeria. *Agricultural Research & Technology*. 6 p.
- Iturri, L.A., Buschiazzi, D.E., Díaz-Zorita, M. 2011. Acidification evidences of no-till soils of the Central region of Argentina. *Ciencia del Suelo*. 29 (1): 13-19.
- Iturri, L. 2015. Evidencias de acidificación de suelos loésicos agrícolas de Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. 173 -198 p.
- Jackson, L.M. 1982. *Análisis químico de suelos*. Editorial Omega. 4ta Edición. Barcelona. España. 662 p.
- Jiang, C., Sun, B., Li, H.X. 2013. Determinants for seasonal change of nematode community composition under long-term application of organic manure in an acid soil in subtropical China. *Eur. J. Soil Biol.*, 55: 91-99.
- Johnson, G., Zhang, H. 2002. Cause and Effects of Soil Acidity. Division of Agricultural Sciences and Natural Resources, Oklahoma State University. PSS-2239.

- Kamprath, E.E. 1984. Crop response to lime on soils in the tropics. In Adams F., Ed. Soil acidity and liming, 2 Ed. Agronomy Monograph. Madison, Wisconsin, USA. N°12: 349-368.
- Larssen, T., Carmichael, G.R. 2000. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition. *Environmental Pollution* 110: 89-102.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. *En: Materia Orgánica «Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos»* (ed. R. Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 1-12.
- Lawford, R.G., Roads, J., Lettenmaier, D.P., Arkin, P. 2007. GEWEX contributions to large-scale hydrometeorology. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4): 629-641.
- Lawford, R.G., Koike, T., Cripe, D., Ochiai, O. 2012. Towards a Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) Water Strategy. AGU Fall Meeting. 1: 8.
- Li, Q., Li, A., Yu, X., Dai, T., Peng, Y., Yuan, D., Zhao, B., Tao, Q., Wang, C., Li, B., Gao, X., Li, Y., Wu, D., Xu, Q. 2019. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s. *Science of the Total Environment*. 698(2020)134320.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibrium in soils. John Wiley and Sons. New York. p. 34-49.
- Liu, G., Mylavarapu, R., Hanlon, E., Lee, C.W. 2014. Soil pH Management for Optimum Commercial Fruit Production in Florida. 10 p.
- Macías, F., Rodríguez, L., Lado, M., Camps, A., Barreal, E. 2005. Mecanismos de amortiguación de impactos acidificantes. Influencia de la litología, propiedades superficiales y grado de desarrollo edáfico. *Edafología*, 12 (2): 115-126.
- Magra, G., Ausilio, A. 2004. Facultad de Ciencias Agrarias. UNR. 8/2014. Rev. Agromensajes. 5 p.
- Mainero, J., Merani, V., Larrieu, I., Vázquez, M., Juan, L., Bennardi, D., Millán, G. 2016. Neutralización de la acidificación generada por la fertilización nitrogenada en un ciclo productivo de Raigras. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. (108) 9 p.
- Mark, L. McFarland, V.A., Haby, L.A., Bade, D. 2005. Managing Soil Acidity. Department of Soil and Crop Sciences. Texas, USA. 6 p.
- McCarty, L.B., Rodriguez, I.R., Bunnell, B.T., Waltz, F.O. (2003) Fundamentals of Turf Grass and Agricultural Chemistry. John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 1198.
- McCauley, A., Jones, C., Olson, K. 2017. Nutrient management module N°8. Soil pH and Organic Matter. Montana, USA. 14 p.

- McGahan, D.G., Southard, R.J., Zasoski, R.J. 2003. Mineralogical comparison of agriculturally acidified and naturally acidic soils. *Geoderma*, 114: 355– 368.
- Melgar, R., Camozzi, M., Amozzi, E., Lavandera, J. 2003. Trigo: fertilización con potasio, azufre y magnesio. Proyecto Fertilizar. INTA. <http://www.fertilizar.org.ar>.
- Melgar, R. 2005. El mercado de fertilizantes en la Argentina y su relación con el sector agropecuario. *En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos (eds. HE Echeverría & FO García)*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. 489-502.
- Michelena, RO., Irurtia, C., Pittaluga, A., Vavruska, F., De Sardi, M. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*. 6(1): 60-66.
- Millán, G., Vázquez, M., Terminiello, A., Santos, D. 2010. Efecto de las enmiendas básicas sobre el complejo de cambio en algunos suelos ácidos de la región pampeana. *CI. Suelo* 28(2): 31-140.
- Molina, E. 1998. Acidez y encalado de los suelos. *Agronomía Costarricense de la Ciencia del Suelo*. 45 p.
- Mondal G.K., Pal, S.K., Roy, A. 2004. Effect of different forms of soil aluminium and acidity on P availability to wheat under different land uses in Terai soils of West Bengal. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 52: 286-288.
- Morales, C., Parada S. 2005. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Capítulo I. Editorial CEPAL N°87, 267 p.
- Nair, V., Portier, K., Graetz, D., Walker, M. 2004. An environmental threshold for degree of phosphorus saturation in sandy soils. *J. Environ. Qual.* 33(1): 107-113.
- Nettleton, N.V., Brownfield, S. H., Benham, E.C., Bun, R., Hipple, K., McGrath, C. L., Sinclair, H.R. 2001. Predictive models for selected chemical properties of Andisols. *Soil Survey Horizons*. 42-99.
- Oliva, D.P. 2009. Determinación de la acidez intercambiable a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua. Universidad Zamorano. 28 p.
- Oliveira, D., Vargas, A., Zimmer, J. Freitas, V., Prior, S. 2018. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: A study from subtropical Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 40: 1807-8621.
- Oyarzábal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barreris, I., Maturo, H., Aragón, R., Campanello, P., Prado, D., Oesterheld, M., León, R. 2018. Unidades de vegetación de la Argentina. Asociación Argentina de Ecología, *Ecología Austral* 28: 040- 063.
- Panda, S., Singha, L., Khan, M. 2003. Does aluminum phytotoxicity induce oxidative stress in greengram (vigna radiata). *Bulg J. Plant Physiol.* (29): 77-86.

- Pati, R., Mukhopadhyay, D. 2010. Forms of soil acidity and the distribution of DTPA-extractable micronutrients in some soils of West Bengal (India). Department of Soil Science & Agricultural Chemistry, Uttar Banga Krishi Viswavidyalaya, Pundibari, CoochBehar, West Bengal, India. 14-17.
- Pavan, M.A. 1983. Alumínio em solos ácidos do Paraná: relação entre o alumínio não-trocável, trocável e solúvel, com o pH, CTC, porcentagem de saturação de Al e matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.7: 39-46.
- Pellegrini, A., Ferro, D., Bennardi, G., Genazini, C., Vázquez, M. 2016. Efecto de la acidificación edáfica sobre los aluminosilicatos en un suelo de la Región Pampeana. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. (153) 10 p.
- Pilatti, M., Grenon, D., Carrizo, M. 2008. Información química de Argiudoles del centro de Santa Fe, pH y cationes intercambiables: potasio, calcio y magnesio. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 7 (1-2): 122-130.
- Pimentel, F. 1984. A estatística moderna na pesquisa agropecuária. Piraciaba: Potafos, 24p.
- Pla Sentis, I. 2006. Problemas de degradación de suelos en América Latina: Evaluación de causa y efectos. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. 9 p.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 1994. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ed. Mundi Prensa. 929 p.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C., De Laburu, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. España. Mundi-Prensa. 917 p.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Mundi-Prensa. 930 p.
- Presutti, M., Bennardi, D., Farias Calvo, A., Vázquez, M. 2017. Acidificación de los suelos de la Provincia de Buenos Aires y su necesidad de enmienda calcárea. *Revista de Divulgación Técnica Agropecuaria, Agroindustrial y Ambiental Facultad de Ciencias Agrarias. UNLZ. Vol. 4 (1): 67-76.*
- Rahman, M.A., Lee, S.H., Ji, H.C., Kabir, A.H., Jones, C.S., Lee, K.W. 2018. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. *International Journal of Molecular Sciences* 19 (10): 3073.
- Rengasamy, P. 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Plant Funct. Biol.*, (37): 613–620.
- Romero, N. 2003. Alfalfa: limitantes productivas en la Región Pampeana. Producción bovina de carne. www.produccion-animal.com.ar
- Roy, B., Bhadra, S. 2014. Effects of Toxic Levels of Aluminum on Seedling Parameters of Rice under Hydroponic Culture. Department of Genetics and Plant Breeding, Regional Research Station. *Rice Science*, 21(4): 217–223.

- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M. 2006. Acidificación de los suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 8 p.
- Sainz Rozas, H., Echeverria, E., Angelini, H. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia suelo* vol.29 No.1: 29-37.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverria, E., Angelini, H., Barbieri, P., Larrea, G., Ferraris, G., Barraco, M. 2013. Estado de la fertilidad de los suelos argentinos. *Actas simposio de fertilidad. INPI Fertilizar*. 62-72.
- Selinger, V. 2017. Tendencias futuras de acidificación de suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa*. Volumen 27, N° 2: 60-68.
- Seybold, C.A., Finnell, P.R., Elrashidi, M. 2008. Estimating Total Acidity from Soil Properties Using Linear Models. *USDA*. Volume 174, Number 2: 88-92.
- Sierra, E., Hurtado, R., Spescha, L. 1994. Corrimiento de las isoyetas anuales medias decenales en la Región Pampeana 1941-1990. *Rev. Facultad de Agronomía*, 14(2): 139-144,1993/94.
- Sims, J.T. 1996. Lime requirement. Chapter 17, in D. L. Sparks, A. L. Page, and P. A. Helmke, editors, *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. No 5. Soil Science Society of America. 491-515.
- Sosa, D.A. 1994. II Curso de Capacitación en Producción de Yerba Mate. INTA. Centro Regional Misiones, E.E.A Cerro Azul. p 68-85.
- Sosa, D.A. 2012. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos. INTA. Centro Regional Misiones, E.E.A Cerro Azul. p 10.
- Sparks, D.L. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part 3; Chemical Methods*. No. 5. Soil Sci. Soc. Amer, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 517-550.
- Stevens, C.J., Dise, N.B., Gowing, D.J. 2009. Regional trends in soil acidification and exchangeable metal concentrations in relation to acid deposition rates. *Environmental pollution*. 157:313–319.
- Sumner, M.E., Miller, W.P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. Chapter 40. In: JM Bartels (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3*: 1201-1229.
- Takele, C., Iticha, B., Sori, G. 2018. Digital Mapping to Explain Spatial Variability and Aid Accurate Management of Soil Acidity. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 18 (5): 275-281.
- Tan, K.H. 1998. *Principles of Soil Chemistry*. CRC Press Amazon. 3 Edition. 369 p.
- Tavakkoli, E., Rengasamy, P., Smith, E., McDonald, G.K. 2015. The effect of cation-anion interactions on soil pH and solubility of organic carbon. *Eur. J. Soil Sci.*, 66: 1054–1062.

- Thomas, G.W., Hargrove, W.L. 1984. The chemistry of soil acidity. In: ADAMS, F. (Ed.) Soil acidity and liming. Madison: ASA, CSSA, SSSA. cap.1: 3-56.
- Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. Chapter 16, in D. L. Sparks, A. L. Page, and P. A. Helmke, editors, Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. No 5. Soil Science Society of America. 491-515.
- Thomson, C.J., Marschner, H., Römheld, V. 1993. Effect of Nitrogen Fertilizer Form on pH of the Bulk Soil and Rhizosphere, and on the Growth, Phosphorus, and Micronutrient Uptake of Bean. Journal of Plant Nutrition, 16: 493- 506.
- Urricariet, S., Lavado, R.S. 1999. Indicadores de deterioro en suelo de la Pampa Ondulada. Ciencia del Suelo 17: 37-44.
- Van Raij, B.1991. Fertility of acid soils. In Plant–soil interactions at low pH. (ed. R. Wright et al.). Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 159-167.
- Vázquez, M. 2011. Causas de la acidificación en el ámbito templado argentino, consecuencias y avances para su diagnóstico. En F.O. García y A. Correndo (eds) Simposio de fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción.
- Vázquez, M., Terminiello, A., Millán, G., Davedere, I., Baridón, E. 2012. Dynamics of soil liming materials broadcast on a thaptoargic hapludoll soil in Argentina. Ciencia del Suelo, 31 (1): 10 p.
- Vázquez, M., Pagani, A. 2014. Calcio y Magnesio del suelo. Manejo de fertilización y enmiendas. En: Echeverría, H. & F. García. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ed. INTA, Cap. 11: 317-355.
- Veenstra, J. 2010. Fifty years of agricultural soil change in Iowa. Graduate Theses and Dissertations. 11428. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/11428>.
- Videla, C., Baquero, V., Studdert, G., Zamuner, E., Picone, L. 2012. Acidez Y Exportación De Bases En Suelos Bajo Uso Agrícola. Actas 19° Congreso 48 Latinoamericano – 19° Congreso Latinoamericano – 23° Congreso Argentino De La Ciencia Del Suelo. Mar Del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science. 37: 29-38.
- Wild, A. 1992. Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russell. Versión Española, P. Urbano Terron y C. Rojo Hernández. Ed. Mundi Prensa. 1045 p.
- Wingeyer, A., Amado, J.C., Pérez, M., Studdert, G., Perdomo, C., Garcia, F., Karlen, D. 2015. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. Sustainability ISSN 2071-1050. p 2213-2242.

- Wyngaard, N., Echeverría, H. Sainz Rozas, H., Divito, G. 2012. Long-term fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudol. *Soil Till. Res.* 119:22-30.
- Yokota, S., Ojima, K. 1995. Physiological response of root tip of alfalfa to low pH and aluminum stress in water culture. *Plant Soil* 171: 163-165.
- Yu, HN., Liu, P., Wang, Z.Y., Chen, W.R., Xu, G.D. 2011. The effect of aluminum treatments on the root growth and cell ultrastructure of two soybean genotypes. *Crop Protection* 30: 323–328.
- Zapata, R.D. 2004. *Química de la acidez del suelo*. ISBN 958-33-6712-5. Universidad Nacional de Colombia. 197-208 p.

6. ANEXOS.

6.1. Anexo 1: Coordenadas y análisis granulométrico de los sitios estudiados.

Tabla 13. Coordenadas y análisis granulométrico de los sitios estudiados.

Grupos	Uso del suelo	Coordenadas		Análisis granulométrico		
		Latitud	Longitud	Arcilla	Limo	Arena
A1	Agrícola	32°29'53.90"	61°34'04.60"	26	57	17
A1	Agrícola	33°48'20.08"	60°36'22.07"	28	50	22
A1	Agrícola	33°15'28.65"	60°51'59.17"	30	48	22
A1	Agrícola	33°15'25.04"	60°51'49.36"	35	50	15
A1	Agrícola	33°15'23.28"	60°52'35.81"	30	48	22
A1	Agrícola	33°15'23.28"	60°52'35.81"	30	48	22
A1	Agrícola	33°14'32.37"	60°52'04.80"	30	52	18
A1	Agrícola	33°15'11.47"	60°52'24.23"	30	58	12
A1	Agrícola	33°15'29.06"	60°51'47.41"	35	52	13
A1	Agrícola	33°15'19.80"	60°52'15.22"	30	55	15
A1	Agrícola	33°15'15.36"	60°52'18.90"	33	52	15
A1	Agrícola	33°15'21.95"	60°52'25.13"	32	53	15
A1	Agrícola	33°54'49.30"	60°23'31.20"	20	70	10
A1	Agrícola	34°17'52.97"	61°33'31.64"	22	36	42
A1	Agrícola	34°18'23.55"	61°33'28.06"	26	48	26
A1	Agrícola	34°18'07.56"	61°33'21.70"	24	50	26
A1	Prístino	33°46'12.04"	60°51'14.86"	28	54	18
A2	Agrícola	33°46'23.70"	60°20'07.00"	28	55	17
A2	Agrícola	33°46'13.50"	60°20'10.80"	35	52	13
A2	Prístino	33°46'16.65"	60°21'08.22"	32	48	20
A3	Agrícola	34°09'40.68"	60°09'50.02"	22	58	20
A3	Agrícola	34°08'51.32"	60°09'02.30"	22	56	22
A3	Prístino	34°04'42.00"	59°47'05.00"	24	52	24
A4	Agrícola	34°48'46.65"	59°44'50.45"	20	38	42
A4	Prístino	34°48'41.20"	59°45'43.99"	21	42	37
A4	Agrícola	34°52'25.89"	59°39'31.68"	28	48	24
A5	Agrícola	34°05'48.80"	61°08'26.00"	23	53	24
A5	Prístino	34°05'59.70"	61°08'18.50"	25	48	27
A6	Agrícola	37°05'60.30"	57°52'47.80"	18	45	37
A6	Prístino	36°18'43.00"	57°28'43.00"	22	38	40
A7	Agrícola	34°10'12.00"	59°28'40.00"	21	58	21
A7	Agrícola	34°10'52.00"	59°30'19.00"	22	57	21
A7	Agrícola	34°11'24.00"	59°28'39.00"	20	60	20
A7	Prístino	34°13'20.00"	59°36'40.00"	26	58	16
A8	Agrícola	33°42'29.16"	59°43'02.44"	21	42	37
A8	Agrícola	33°41'52.58"	59°42'25.65"	20	51	29
A8	Agrícola	33°41'36.91"	59°43'04.62"	20	54	26
A8	Prístino	33°41'43.39"	59°41'56.51"	20	48	32

Tabla 13. Continuación.

Grupos	Uso del suelo	Coordenadas		Análisis granulométrico		
		Latitud	Longitud	Arcilla	Limo	Arena
H1	Agrícola	35°54'05.90"	60°33'73.80"	15	22	63
H1	Agrícola	35°50'10.80"	60°43'28.00"	20	24	56
H1	Agrícola	35°53'74.10"	60°47'40.10"	20	18	62
H1	Agrícola	35°52'75.10"	60°35'63.00"	18	21	61
H1	Prístino	37°28'40.00"	60°45'53.00"	16	28	56
H2	Agrícola	34°53'21.78"	60°25'38.98"	18	38	44
H2	Agrícola	34°53'21.78"	60°25'21.74"	20	35	45
H2	Agrícola	35°11'52.29"	60°25'52.10"	28	36	36
H2	Prístino	35°11'02.41"	60°26'02.19"	24	32	44
H3	Agrícola	35°11'17.00"	61°59'38.00"	23	37	40
H3	Agrícola	35°11'07.00"	61°59'51.00"	22	36	42
H3	Agrícola	35°10'56.00"	61°59'38.00"	25	34	41
H3	Agrícola	35°50'60.90"	61°28'42.80"	18	37	45
H3	Agrícola	35°50'71.40"	61°31'13.30"	20	33	47
H3	Agrícola	35°56'05.10"	61°12'49.80"	20	35	45
H3	Agrícola	35°55'54.70"	61°12'39.80"	21	25	54
H3	Prístino	35°56'09.40"	61°12'39.80"	18	32	50
H4	Agrícola	35°37'10.20"	63°14'05.20"	18	20	62
H4	Agrícola	34°53'02.20"	62°20'10.50"	20	32	48
H4	Agrícola	34°51'36.70"	62°46'23.10"	18	24	58
H4	Agrícola	35°37'12.10"	63°15'50.30"	15	28	57
H4	Agrícola	35°06'52.80"	63°16'49.50"	18	22	60
H4	Prístino	34°51'36.70"	62°46'23.10"	16	22	62
H5	Agrícola	35°09'09.90"	61°07'36.80"	22	37	41
H5	Agrícola	35°11'57.40"	61°05'08.20"	18	47	35
H5	Agrícola	35°11'51.40"	61°05'08.80"	20	35	45
H5	Agrícola	35°09'57.80"	61°06'17.00"	20	41	39
H5	Agrícola	35°11'10.17"	61°05'20.05"	20	35	45
H5	Agrícola	35°10'59.30"	61°05'08.80"	18	38	44
H5	Agrícola	35°09'53.30"	61°06'17.70"	20	38	42
H5	Agrícola	35°09'48.20"	61°06'21.80"	17	43	40
H5	Prístino	35°09'41.23"	61°07'05.85"	20	42	38
H6	Agrícola	33°13'48.38"	62°59'35.63"	18	52	30
H6	Prístino	33°13'48.07"	62°59'18.66"	20	50	30
H7	Agrícola	36°33'31.00"	63°59'42.00"	20	46	34
H7	Prístino	36°32'24.00"	63°59'40.00"	18	42	40
H8	Agrícola	36°30'42.70"	62°44'06.78"	15	15	70
H8	Agrícola	36°30'14.06"	62°44'10.13"	18	20	62
H8	Agrícola	36°30'54.29"	62°44'50.21"	18	15	67
H8	Prístino	36°31'00.23"	62°44'14.17"	18	15	67

6.2. Anexo 2: Matriz de los coeficientes de correlación de las variables estudiadas.

Tabla 14. Matriz de los coeficientes de correlación de las variables estudiadas.

Variables	pH A	pH p	Acidez i	Al _i	S. Bases	CICE	MOS	Arcilla	Limo	Arena
pH actual	1,00									
pH potencial	0,82	1,00								
Acidez i	-0,81	-0,79	1,00							
Al_i	-0,82	-0,74	0,80	1,00						
S. Bases	0,83	0,79	-0,82	-0,78	1,00					
CICE	0,83	0,70	-0,82	-0,77	0,99	1,00				
MOS	0,31	0,23	-0,20	-0,22	0,32	0,32	1,00			
Arcilla	-0,13	-0,15	0,08	0,19	-0,07	-0,07	0,50	1,00		
Limo	-0,06	-0,08	0,01	0,03	0,05	0,05	0,52	0,55	1,00	
Arena	0,09	0,11	-0,03	-0,09	-0,02	-0,02	-0,57	-0,75	-0,96	1,00
Precipitación	-0,24	-0,16	0,20	0,17	-0,11	-0,11	0,22	0,48	0,60	-0,62

Tabla 15. Matriz de correlación / probabilidades de las variables estudiadas.

Variables	pH A	pH p	Acidez i	Al _i	S. Bases	CICE	MOS	Arcilla	Limo	Arena
pH A										
pH p	<0,0001									
Acidez i	<0,0001	<0,0001								
Al_i	<0,0001	<0,0001	<0,0001							
S. Bases	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001						
CICE	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001					
MOS	0,0055	0,0431	0,0724	0,0480	0,0039	0,0038				
Arcilla	0,2664	0,1978	0,4975	0,1027	0,5360	0,5441	<0,0001			
Limo	0,5789	0,4770	0,9270	0,7627	0,6605	0,6559	<0,0001	<0,0001		
Arena	0,4295	0,3324	0,7739	0,4517	0,8807	0,8737	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
Precipitación	0,0313	0,1689	0,0839	0,1364	0,3165	0,3205	0,0485	<0,0001	<0,0001	<0,0001

6.3. Anexo 3: Autovectores del análisis de componentes principales.

Tabla 16. Autovectores y análisis de correlación de las variables estudiadas.

Variables	Autovectores		Correlaciones ACP	
	e1	e2	CP1	CP2
pH actual	0,41	-0,0018	0,93	-0,0034
pH potencial	0,39	0,01	0,89	0,01
Acidez _i	-0,40	0,02	-0,91	0,03
Al _i	-0,39	-0,0045	-0,89	-0,01
S. Bases	0,41	-0,06	0,94	-0,12
CICE	0,41	-0,07	0,94	-0,12
MOS	0,13	-0,38	0,30	-0,69
Arcilla	-0,07	-0,43	-0,16	-0,79
Limo	-0,03	-0,49	-0,06	-0,91
Arena	0,04	0,53	0,10	0,97
Precipitación	-0,11	-0,38	-0,24	-0,69